การเพิ่มศักยภาพการผลิตไบโอมีเทนจากกากมันสำปะหลัง โดยใช้คลื่นอัลตร้าโซนิคในกระบวนการย่อยสลายขั้นต้น

นายกงจักร ลมวิชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2558

ENHANCEMENT OF BIO - METHANE PRODUCTION FROM CASSAVA PULP USING ULTRASONIC WAVE IN PRETREATMENT PROCESS

Kongjak Lomwichai

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering in Agricultural and Food Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2015

การเพิ่มศักยภาพการผลิตไบโอมีเทน จากกากมันสำปะหลังโดยใช้คลื่นอัลตร้าโซนิค ในกระบวนการย่อยสลายขั้นต้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

____

(ผศ. ดร.พยุงศักดิ์ จุลยุเสน)

ประธานกรรมการ

____

(ผศ. ดร.วีรชัย อาจหาญ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

____

(อ. ดร.พรรษา ลิบลับ)

กรรมการ

____

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

____

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

กงจักร ลมวิชัย : การเพิ่มศักยภาพการผลิตไบโอมีเทนจากกากมันสำปะหลังโดยใช้คลื่นอัลตร้าโซนิคในกระบวนการย่อยสลายขั้นต้น (ENHANCEMENT OF BIO - METHANE PRODUCTION FROM CASSAVA PULP USING ULTRASONIC WAVE IN PRETREATMENT PROCESS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย อาจหาญ, 87 หน้า

กากมันสำปะหลังเป็นวัสดุเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งสามารถเพิ่มมูลค่าได้โดยการนำไปผลิตไบโอมีเทนเพื่อเป็นแหล่งพลังงานได้ อย่างไรก็ตาม กากมันสำปะหลังจำเป็นต้องผ่านกระบวนการย่อยสลายขั้นต้นก่อน โดยในงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการเพิ่มศักยภาพการผลิตไบโอมีเทนจากกากมันสำปะหลังโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิคขนาด 160 W ในกระบวนการย่อยสลายขั้นต้น โดยจะศึกษาผลของความเข้มข้นของกากมันสำปะหลัง (0.5-4.0 % w/v) และเวลาในการในการให้คลื่นอัลตราโซนิค (10-30 min) ต่อลักษณะโครงสร้างทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และศักยภาพในการผลิตไบโอมีเทน ผลการศึกษาพบว่าคลื่นอัลตราโซนิคทำให้โครงสร้างของเส้นใยในกากมันสำปะหลังมีความพรุนและความโปร่งเพิ่มมากขึ้น และทำให้องค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ (SCOD) มากขึ้นเทียบกับกากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นอยู่ในช่วงร้อยละ 4.44-14.80 และเมื่อนำไปทดสอบศักยภาพการผลิตไบโอมีเทนแล้วพบว่า สภาวะการทดลองที่ความเข้มข้นของกากมันสำปะหลังร้อยละ 2.25% w/v และเวลาการให้คลื่นอัลตราโซนิค 20 min จะให้ค่าผลผลิตมีเทนสูงสุดเท่ากับ 267.07±1.51 $mLCH_4/gVS_{added}$ และที่สภาวะความเข้มข้นของกากมันสำปะหลังร้อยละ 4.00% w/v และเวลาการให้คลื่นอัลตราโซนิค 20 min จะให้ค่าผลผลิตมีเทนต่ำสุดเท่ากับ 70.26 ±7.92 $mLCH_4/gVS_{added}$ นอกจากนี้ในการสร้างแบบจำลองพื้นผิวตอบ (Response Surface Model, RSM) เพื่อใช้ในการทำนายผลผลิตมีเทนพบว่า สามารถใช้ค่าความเข้มข้นของกากมันสำปะหลังและเวลาในการให้คลื่นอัลตราโซนิค ในการทำนายการผลิตมีเทนได้ดี ซึ่งมีค่า Adj.R^2 เท่ากับ 0.861

สาขาวิชา วิศวกรรมเกษตร

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนักศึกษา____________________

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา____________________

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

KONGJAK LOMWICHAI : ENHANCEMENT OF BIO - METHANE PRODUCTION FROM CASSAVA PULP USING ULTRASONIC WAVE IN PRETREATMENT PROCESS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. WEERACHAI ARJHARN, Ph.D., 87 PP.

PRETREATMENT/ULTRASONIC/BIOGAS/CASSAVA PULP/BIOCHEMICAL POTENTIAL ASSAY/ANAEROBIC DIGESTION

Cassava pulp is a residue in starch production industry. It can be value added by using to produce biomethane as a source of energy. However, a pretreatment process is required prior to its production. In this research, the enhancement of biomethane production from cassava pulp was studied using ultrasonic wave with power of 160 W as a pretreatment process. The effects of cassava pulp concentration (0.5-4.0 % w/v) and ultrasonic wave treating time (10-30 min) on physical structure, chemical composition and biomethane potential were investigated. Results showed that ultrasonic wave treatment caused changes in cassava pulp fiber, creating more porous and loose structure. Moreover, the soluble chemical oxygen demand (SCOD) of pretreated samples was found to increase by 4.44-14.8% compared to that of unpretreated sample. When the treated samples were subsequently used to produce biomethane, the cassava pulp concentration of 2.25% w/v and ultrasonic wave treating time of 20 min gave the highest methane yield of 267.07±1.51 $mLCH_4/gVS_{added}$ while the lowest methane yield was found with the condition of 4.00% w/v and 20 min with the value of 70.26±7.92 $mLCH_4/gVS_{added}$. The response surface model (RSM) developed for methane yield prediction indicated that cassava

pulp concentration and ultrasonic wave treating time could predict methane yield efficiently with an Adj.R^2 value of 0.861.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Agricultural Engineering Student's Signature ___________________

Academic Year 2015 Advisor's Signature___________________

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องมาจากความใส่ใจและเมตตาของคณาจารย์ รวมทั้งกำลังใจจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย อาจหาญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูง ที่ท่านได้ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษาด้านวิชาการ คอยให้การช่วยเหลือ และแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ให้กับผู้วิจัยมาโดยตลอด จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พยุงศักดิ์ จุลยุเสน อาจารย์ ดร.พรรษา ลิบลับ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการอันเป็นประโยชน์ ตลอดจนช่วยตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้สำเร็จลงได้โดยสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ดร.ศรัลย์ ปานศรีพงษ์ ดร.ทิพสุภินทร์ หินซุย บุคลากรศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล บัณฑิตศึกษา และบุคลากร สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือ สนับสนุนให้การทำวิจัย สำเร็จลุล่วง ขอกราบระลึกถึงบุญคุณของครูบาอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้กับศิษย์ และขอขอบคุณกำลังจากทุกท่านในครอบครัวอันเป็นส่วนสำคัญยิ่งให้สามารถต่อสู้และผ่านปัญหาอุปสรรคต่าง ๆ มาได้

สำคัญที่สุด ขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ผู้ให้กำเนิด ให้การเลี้ยงดู ส่งเสริมการศึกษา ให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน อย่างดีที่สุดเสมอมา ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้และมีหลักธรรมในการดำเนินชีวิตที่ดี และอบรมสั่งสอนให้ผู้วิจัยระลึกถึงการนำเอาความรู้ที่ร่ำเรียนมาทำประโยชน์ตอบแทนให้แก่แผ่นดิน

กงจักร ลมวิชัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)..ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)..ข
กิตติกรรมประกาศ...ง
สารบัญ ....จ
สารบัญตาราง ....ญ
สารบัญรูป ....ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ ....ฑ
บทที่ 1 บทนำ..1
1.1 ที่มา และความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์...2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ 3
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4
2.1 สถานการณ์การผลิตมันสำปะหลังในประเทศไทย 4
2.2 อุตสาหกรรมมันสำปะหลัง..6
2.2.1 อุตสาหกรรมมันเส้น (Cassava chips)...6
2.2.2 อุตสาหกรรมมันอัดเม็ด (Cassava pellets) 6
2.2.3 อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch)..7
2.3 องค์ประกอบในกากมันสำปะหลัง (Cassava pulp)...10
2.3.1 แป้ง (Starch)...10
2.3.2 เส้นใย (Fiber) 11
2.4 การใช้ประโยชน์กากมันสำปะหลัง..12
2.4.1 การใช้ประโยชน์กากมันสำปะหลังในการผลิตอาหารสัตว์.....................................12
2.4.2 การใช้ประโยชน์กากมันสำปะหลังในการผลิตแก๊สชีวภาพ.....................................12
2.5 กระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบไร้อากาศ 13

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.1 ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) 13
2.5.2 อะซิโดเจนนิซิส (Acidogenesis) 13
2.5.3 อะซิโตเจนนิซิส (Acetogenesis) 14
2.5.4 เมทาโนเจนนิซิส (Methanogenesis) 14
2.5.5 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ 14
2.6 กระบวนการย่อยสลายขั้นต้น (Pretreatment) 15
2.6.1 กระบวนการทางกล 17
2.6.2 กระบวนการทางความร้อน 18
2.6.2.1 การระเบิดด้วยไอน้ำ (Stream explosion) 18
2.6.2.2 การระเบิดด้วยแอมโมเนีย (Ammonia fiber explosion, AFEX) 18
2.6.3 กระบวนการทางเคมี 18
2.6.3.1 การย่อยสลายด้วยโอโซน (Ozonolysis) 18
2.6.3.2 การย่อยสลายด้วยกรด (Acid hydrolysis) 19
2.6.3.3 การย่อยสลายด้วยด่าง (Alkaline hydrolysis) 19
2.6.3.4 การย่อยสลายออกซิเดชัน (Oxidative delignification) 20
2.6.4 กระบวนอื่น ๆ 20
2.7 ศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทน (Biochemical Methane Potential, BMP) 21
2.8 คลื่นเสียงอัลตราโซนิค (Ultrasonic) 21
2.8.1 คาวิเตชัน (Cavitation) (Mason, 1991) 22
2.8.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดคาวิเตชัน (Timothy, 2003) 23
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 24
2.10 การออกแบบการทดลอง (Design of experiment, DOE) 29
3 เครื่องมือและวิธีดำเนินการวิจัย 32
3.1 ขั้นตอนการวิจัย 32
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย 33
3.2.1 การเตรียมกากมันสำปะหลัง 33
3.2.2 การเตรียมเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์ (Seed culture) 34

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.3 ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของกากมันสำปะหลัง 34
3.2.3.1 ความชื้น (Moisture content) 34
3.2.3.2 ปริมาณแป้ง (Starch) 35
3.2.3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน 35
3.2.3.4 Total solid (TS) 35
3.2.3.5 Volatile solid (VS) 36
3.2.3.6 การวิเคราะห์ ซีโอดี (COD) 36
3.2.3.7 การวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพของกากมันสำปะหลัง 36
3.3 การศึกษาผลการย่อยสลายขั้นต้นกากมันสำปะหลังด้วยคลื่นอัลตราโซนิค และผลกระทบของคลื่นอัลตราโซนิค ต่อศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธี (Biochemical methane potential, BMP) 36
3.3.1 การออกแบบการทดลอง 38
3.3.2 การเตรียมหัวเชื้อและการเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ 38
3.3.3 ขั้นตอนการทดลอง 39
3.3.4 ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธี BMP 40
3.3.5 การหาอัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (maximum specific methane production rate, Rm) 41
4 ผลการศึกษาและอภิปรายผล 43
4.1 คุณสมบัติของกากมันสำปะหลังที่ใช้ในการทดลอง 43
4.1.1 ศึกษาคุณสมบัติของกากมันสำปะหลัง 43
4.1.2 คุณสมบัติของหัวเชื้อจุลินทรีย์ (Seed) 44
4.2 การศึกษาผลการย่อยสลายขั้นต้นกากมันสำปะหลังด้วยคลื่นอัลตราโซนิค และผลกระทบของคลื่นอัลตราโซนิคต่อศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธี (Biochemical methane potential, BMP) 44
4.2.1 ผลกระทบของการย่อยสลายขั้นต้นกากมันสำปะหลังด้วยคลื่นอัลตราโซนิคต่อโครงสร้างทางกายภาพ 44
4.2.2 ผลกระทบของการย่อยสลายขั้นต้นกากมันสำปะหลังด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 45

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธี (Biochemical methane potential, BMP) ที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นกากมันสำปะหลังด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 47
4.3.1 ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธี (Biochemical methane potential, BMP) ที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง (TS) ร้อยละ 0.5 (น้ำหนักต่อปริมาตร) และเวลา 20 นาที 47
4.3.2 ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธี (Biochemical methane potential, BMP) ที่ความเข้มข้น (TS) ร้อยละ 1.0 (น้ำหนักต่อปริมาตร) และเวลาในการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 13 นาที และ 27 นาที 49
4.3.3 ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธี (Biochemical methane potential, BMP) ที่ความเข้มข้น (TS) ร้อยละ 2.25 (น้ำหนักต่อปริมาตร) และเวลาในการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 10, 20 และ 30 นาที 50
4.3.4 ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธี (Biochemical methane potential, BMP) ที่ความเข้มข้น (TS) ร้อยละ 3.35 (น้ำหนักต่อปริมาตร) และเวลาในการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 13 นาที และ 30 นาที 52
4.3.5 ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธี (Biochemical methane potential, BMP) ที่ความเข้มข้น (TS) ร้อยละ 4 (น้ำหนักต่อปริมาตร) และเวลาในการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 20 นาที 53
4.4 สรุปศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธี (Biochemical methane potential, BMP) ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง (TS) ร้อยละ 0.5 - 4 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ที่ไม่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 55
4.5 สรุปศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธี (Biochemical methane potential, BMP) กากมันมันสำปะหลังที่ความเข้มข้น (TS) ร้อยละ 0.5 - 4 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคและมีค่าสูงที่สุดของแต่ละความเข้มข้น 57
4.6 แบบจำลองพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Model) RSM 59
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 65
5.1 สรุปผลการทดลอง 65
5.1.1 ผลกระทบของการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 65

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1.2 ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทน (BMP) ที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิค 65
5.1.3 แบบจำลองพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Model, RSM) 65
5.2 ข้อเสนอแนะ 66
รายการอ้างอิง 67
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ 76
ประวัติผู้เขียน 87

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 ปริมาณผลผลิตมันสำปะหลังในประเทศไทย 5

2.2 ปริมาณส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังของประเทศไทยในแต่ละปี 5

2.3 องค์ประกอบทางเคมีในหัวมันสำปะหลังและในเนื้อมัน 5

2.4 องค์ประกอบทางเคมีของกากมันสำปะหลัง (น้ำหนักแห้ง) 10

2.5 ชนิดเส้นใยในกากมันสำปะหลัง (น้ำหนักแห้ง) 12

3.1 รายละเอียดเครื่องอัลตราโซนิค 37

3.2 ชุดการทดลอง (BMP) ที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม RSM 38

3.3 การเตรียมสารอาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ Stock nutrient (ความเข้มข้น 5 เท่า) 39

3.4 การเตรียมสารอาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ Trace element solution 39

3.5 พารามิเตอร์การตรวจวัดในขั้นตอนการวัดศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธี BMP 41

4.1 ตารางคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกากมันสำปะหลัง 43

4.2 ตารางคุณสมบัติของหัวเชื้อจุลินทรีย์ (Seed) 44

4.3 องค์ประกอบของซีโอดีละลายน้ำ (SCOD) ของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 46

4.4 ปริมาณ Methane yield, อัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด และเวลาที่จุลินทรีย์ใช้ในการปรับตัวก่อนเพิ่มจำนวนจากการศึกษา BMP ของกากมันสำปะหลังความเข้มข้น (TS) ร้อยละ 0.5 (w/v) เวลา 20 นาที 49

4.5 ปริมาณ Methane yield, อัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด และเวลาที่จุลินทรีย์ใช้ในการปรับตัวก่อนเพิ่มจำนวน จากการศึกษา BMP ของกากมันสำปะหลังความเข้มข้น (TS) ร้อยละ 1 (w/v) เวลา 13 และ 20 นาที 50

4.6 ปริมาณ Methane yield, อัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด และเวลาที่จุลินทรีย์ใช้ในการปรับตัวก่อนเพิ่มจำนวน จากการศึกษา BMP ของกากมันสำปะหลังความเข้มข้น (TS) ร้อยละ 2.25 (w/v) เวลา 10, 20 และ 27 นาที 52

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

4.7 ปริมาณ Methane yield, อัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด และเวลาที่จุลินทรีย์ใช้ในการปรับตัวก่อนเพิ่มจำนวน จากการศึกษา BMP ของกากมันสำปะหลังความเข้มข้น (TS) ร้อยละ 3.5 (w/v) เวลา 13 และ 27 นาที 53
4.8 ปริมาณ Methane yield, อัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด และเวลาที่จุลินทรีย์ใช้ในการปรับตัวก่อนเพิ่มจำนวน จากการศึกษา BMP ของกากมันสำปะหลังความเข้มข้น (TS) ร้อยละ 4 (w/v) เวลา 20 นาที 55
4.9 ปริมาณ Methane yield, อัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด และเวลาที่จุลินทรีย์ใช้ในการปรับตัวก่อนเพิ่มจำนวน จากการศึกษา BMP ของกากมันสำปะหลังความเข้มข้น (TS) ร้อยละ 0.5 - 4 (w/v) Nopretreatment 57
4.10 ปริมาณ Methane yield, อัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด และเวลาที่จุลินทรีย์ใช้ในการปรับตัวก่อนเพิ่มจำนวน จากการศึกษา BMP ของกากมันสำปะหลังความเข้มข้น (TS) ร้อยละ 0.5 - 4 (w/v) Pretreatment 59
4.11 เปรียบเทียบ Methane yield ที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลอง 61
4.12 ค่า Coefficients estimate และ P - values ของแต่ละปัจจัย 63
4.13 ตาราง ANOVA แสดงผลทำการถดถอย 64
4.14 ผลสรุปความสัมพันธ์ของแบบจำลองพื้นผิวผลตอบ 64
4.15 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ค่าคลาดเคลื่อน (Residual analysis) 64

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง 9
2.2 โครงสร้างของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน 11
2.3 ขั้นตอนในกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ 15
2.4 วัตถุประสงค์ของการย่อยสลายขั้นต้น 16
2.5 ผลจากการย่อยสลายขั้นต้นต่อโครงสร้างวัสดุชีวมวล 21
2.6 หลักการเกิดคาวิเตชัน (Timothy, 2003) 23
2.7 ภาพ 3 วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology, RSM) 30
2.8 การออกแบบ Central Composite Design แบบ 2 ปัจจัย 30
2.9 การออกแบบ Box - Behnken Design 31
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 33
3.2 กากมันสำปะหลังที่ใช้ในการทดลอง 34
3.3 หัวเชื้อจุลินทรีย์จากฟาร์มสุกร 34
3.4 เครื่องกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิคและอัลตราโซนิคทรานดิวเซอร์ 37
3.5 ชุดการศึกษา BMP 40
4.1 กากมันสำปะหลังก่อนและหลังการย่อยสลายขั้นต้น 45
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น (TS) ร้อยละ 0.5 - 4 (w/v) และค่า COD $_{\text{solubilisation}}$ (%) 47
4.3 ปริมาณ Methane yield ที่ความเข้มข้น Total solid ร้อยละ 0.5 (w/v) และเวลา 20 นาที 48
4.4 ปริมาณ Methane yield ที่ความเข้มข้น Total solid ร้อยละ 1 (w/v) เวลา 13, 27 นาที 50
4.5 ปริมาณ Methane yield ที่ความเข้มข้น Total solid ร้อยละ 2.25 (w/v) เวลา 10, 20 และ 30 นาที 51
4.6 ปริมาณ Methane yield ที่ความเข้มข้น Total solid ร้อยละ 3.5 (w/v) เวลา 13 และ 27 นาที 53
4.7 ปริมาณ Methane yield ที่ความเข้มข้น Total solid ร้อยละ 4 (w/v) เวลา 20 นาที 54

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.8 ปริมาณ Methane yield ที่ความเข้มข้น Total solid ร้อยละ 0.5 - 4 (w/v) No pretreatment 56
4.9 ปริมาณ Methane yield ที่ความเข้มข้น Total solid ร้อยละ 0.5 - 4 (w/v) Pretreatment 58
4.10 ภาพจำลอง 3 มิติ 60
4.11 กราฟ Contour 61
4.12 ค่า Residual จากการทดลอง 62
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Methane yield ที่ได้จากการทดลองและการทำนายด้วยแบบจำลอง 62

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

APHA	=	American Public Health Association
ASTM	=	Amarican Society of Testing and Material
BMP	=	Biological Methane Potential คือศักยภาพในการผลิตมีเทน
COD	=	ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand)
DI	=	Deionized Water คือ น้ำปราศจากไอออน
mg	=	มิลลิกรัม
mg/L	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
mL	=	มิลลิลิตร
$mLCH_4/gVS_{added}$	=	มิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมของแข็งระเหยง่ายที่เติมลงในระบบ
rpm	=	round per minute คือ จำนวนรอบต่อนาที
RSM	=	Response Surface Metodology
Temp.	=	Temperature คือ อุณหภูมิ
TS	=	Total Solid คือ ของแข็งทั้งหมด
VS	=	Volatile Solid คือ ของแข็งระเหยง่าย
v/v	=	volume by volume คือ สัดส่วนปริมาตรโดยปริมาตร
w/v	=	weight by volume คือ สัดส่วนน้ำหนักโดยปริมาตร
^{o}C	=	องศาเซลเซียส

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มา และความสำคัญของปัญหา

จากสถิติของสำนักเศรษฐกิจเกษตร ในปี 2551 พบว่าประเทศไทยมีปริมาณผลผลิตมันสำปะหลังสูงสุดเป็นอันดับ 3 ของโลก รองจากไนจีเรีย และบราซิล ตามลำดับ และมีผลผลิตรวมกว่า 20 ล้านตัน และจังหวัดนครราชสีมา เป็นจังหวัดที่มีพื้นที่ปลูกมันสำปะหลังสูงสุด เท่ากับ 1,804,213 ไร่ โดยมีผลผลิตมันสำปะหลังเท่ากับ 5,050,774 ตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2551) ผลผลิตหัวมันทั้งหมดในประเทศไทย 100% จะนำไปผลิตเป็น มันเส้น/มันอัดเม็ด และแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 50 : 50 % ของจำนวนผลผลิตทั้งหมด อุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังจึงถือได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมแปรรูปทางเกษตรกรรมหลักของประเทศไทย ปัจจุบันมีโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังที่จดทะเบียนกับสมาคมการค้าอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังไทยอยู่ 51 โรงงาน (สมาคมแป้งมันสำปะหลังไทย, 2550) ตั้งอยู่ในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมาถึง 21 โรงงาน

กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังจะเกิด By - Product ได้คือ เปลือกมันสำปะหลังและกากมันสำปะหลัง โดยผลผลิตหัวมันสด 20 ล้านตันก่อให้เกิดเปลือกมันสำปะหลัง และกากมันสำปะหลัง เท่ากับ 0.3 ล้านตัน และ 1.5 ล้านตัน ตามลำดับ (สมาคมแป้งมันสำปะหลังไทย, 2550) เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางเคมีของกากมันสำปะหลัง กากมันสำปะหลังประกอบไปด้วยแป้งและเส้นใยอยู่ในปริมาณสูงถึงร้อยละ 50 - 70 และ 20 - 30 โดยน้ำหนักแห้งตามลำดับ (Euis et al., 2011, Siriporn et al., Pandey et al., 2000) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของหัวมันสำปะหลังและกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังในแต่ละโรงงาน การใช้ประโยชน์กากมันสำปะหลังเป็นสิ่งที่สำคัญมากเนื่องจากยังคงมีแป้งตกค้างในกากมันสำปะหลังค่อนข้างสูง กากมันสำปะหลังที่ตกค้างเป็นจำนวนมากคือเกิดการสูญเสียแป้ง และก่อให้เกิดปัญหามลภาวะในโรงงานได้ในกรณีที่ระบายกากมันสำปะหลังออกจากโรงงานไม่ทัน ซึ่งการใช้ประโยชน์กากมันสำปะหลังในปัจจุบันคือ ทำอาหารสัตว์ การเพาะปลูกเห็ด การทำปุ๋ยหมัก

การใช้กากมันสำปะหลังเพื่อนำมาผลิตแก๊สมีเทน พบว่าคุณสมบัติกากมันสำปะหลัง ซึ่งประกอบด้วยแป้งและเส้นใยเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ เม็ดแป้งเชื่อมต่อกันด้วยส่วนของเซลลูโลสและโปรตีน (Sriroth et al., 2000) จากการที่เป็นส่วนของเส้นใยนั้นมีส่วนที่ยากต่อการ

ย่อยสลายด้วยเอนไซม์ โดยกระบวนการย่อยสลายขั้นต้นมุ่งเน้นเพื่อให้องค์ประกอบที่เป็นเส้นใยนั้นย่อยสลายได้ง่ายขึ้น เพื่อที่จะนำไปผลิตเป็นแก๊สมีเทนได้สูงขึ้นด้วยระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศในขั้นตอนต่อไป ซึ่งเทคนิคการย่อยสลายขั้นต้นนั้นมีหลายวิธี เช่น วิธีทางกล วิธีทางเคมี และวิธีทางชีวภาพ หรือใช้วิธีการผสมผสาน โดยกระบวนการย่อยสลายขั้นต้นในแต่ละประเภทจะมีความเหมาะสมขึ้นอยู่ปัจจัยหลายอย่าง ซึ่งความสามารถในการย่อยสลายขั้นต้นนี้จะถูกวัดได้ด้วยค่าพารามิเตอร์ของสารที่มีอยู่ในสารละลายกากมันสำปะหลังนั้น ๆ ซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญที่จะนำไปสู่การย่อยสลายทางชีวภาพในขั้นตอนต่อ ๆ ไป

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาการเตรียมกากมันสำปะหลังเพื่อศึกษาถึงขั้นตอนและกระบวนการเพิ่มศักยภาพการผลิตไบโอมีเทนจากกากมันสำปะหลัง โดยเน้นกระบวนการย่อยสลายขั้นต้น (Pretreatment) กากมันสำปะหลังโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิค เพื่อเป็นการใช้ประโยชน์จากกากมันสำปะหลังในการผลิตเป็นแก๊สมีเทน ลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมและเสาะแสวงหาพลังงานทางเลือกเพื่อทดแทนพลังงานฟอสซิลที่กำลังจะหมดไป

1.2 วัตถุประสงค์

1) เพื่อศึกษากระบวนการย่อยสลายขั้นต้นกากมันสำปะหลัง สำหรับนำมาผลิตแก๊สมีเทนโดยวิธีทางกล (อัลตราโซนิค)

2) เพื่อประเมินศักยภาพของการผลิตแก๊สมีเทน (BMP) จากกากมันสำปะหลังที่ได้จากการกระบวนการย่อยสลายขั้นต้นด้วยอัลตราโซนิค

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษากระบวนการย่อยสลายขั้นต้นกากมันสำปะหลัง เพื่อนำไปผลิตเป็นแก๊สมีเทน โดยทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory Scale) มีขอบเขตการศึกษาดังนี้

1) กากมันสำปะหลังที่ใช้เป็นกากมันสำปะหลังจากโรงงาน โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา

2) สภาวะที่ใช้ในการเดินเครื่องกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิค รุ่น AG 1007 ขนาด 200W ความถี่ 20 kHz - 2 MHz โดยกำหนดความถี่ที่ใช้ทดสอบ 45 kHz ในกระบวนการย่อยสลายขั้นต้น

3) ศึกษาศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนจากกากมันสำปะหลังโดยใช้กากมันสำปะหลังที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายขั้นต้นที่ความเข้มข้น (น้ำหนักต่อปริมาตร) และเวลาต่าง ๆ จากการออกแบบโดยโปรแกรม Response Surface Methodology (RSM)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1) ทำให้ทราบสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการย่อยสลายขั้นต้น โดยวิธีทางกล (อัลตราโซนิค)

2) ทำให้ทราบศักยภาพของการผลิตแก๊สมีเทน (BMP) จากกากมันสำปะหลังหลังจากที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิค ในกระบวนการย่อยสลายขั้นต้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สถานการณ์การผลิตมันสำปะหลังในประเทศไทย

มันสำปะหลัง เป็นพืชเศรษฐกิจอีกชนิดหนึ่งที่สำคัญของประเทศไทย ชื่อวิทยาศาสตร์ Manihotesculenta L. Crantz มีชื่อเรียกในภาษาอังกฤษว่า แคสซาวา (Cassava) หรือ ทาพิโอกา (Tapioca) มีพื้นที่เพาะปลูกส่วนใหญ่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยผลผลิตส่วนใหญ่มาจากจังหวัดนครราชสีมา คิดเป็น 57% จากผลผลิตทั้งหมด (Sriroth et al., 2000) โดยปริมาณผลผลิตมันสำปะหลังของประเทศไทยแต่ละปีได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 ซึ่งประเทศไทยมีผลผลิตจากการปลูกมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นทุก ๆ ปี โดยหัวมันสดจะถูกแปรรูปเพื่อนำไปใช้ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น มันเส้น มันอัดเม็ด แป้งมันสำปะหลัง เป็นต้น ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะนำมาใช้ประโยชน์ทั้งภายในประเทศและส่งออกต่างประเทศในรูปแบบต่าง ๆ ตารางที่ 2.2 โดยประเทศไทยนั้นมีการส่งออกผลิตภัณฑ์จากมันสำปะหลังเป็นอันดับหนึ่งของโลก และปริมาณการผลิตยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี นอกจากนี้ในแต่ละปีมีปริมาณการผลิตของมันสำปะหลังประมาณ 45 % จะถูกนำมาผลิตแป้งมันสำปะหลัง และจากการผลิตแป้งมันสำปะหลังมีเศษเหลือประมาณ 10 - 15 % ของหัวมันสำปะหลังสด (Sriroth et al., 2000) มาจากการล้าง การปอกเปลือก และการสกัดแป้ง ซึ่งประกอบด้วย น้ำทิ้ง เศษดินทราย เปลือกมันสำปะหลัง และกากมันสำปะหลัง (Cassava pulp) ประมาณ 3 - 6 % ของปริมาณเศษทั้งหมด

มันสำปะหลังเป็นพืชที่เก็บสะสมอาหารไว้ที่รากในรูปของแป้ง ความสามารถในการสร้างและสะสมแป้งที่รากแตกต่างกันขึ้นอยู่กับพันธุ์ อายุการเก็บเกี่ยว ปริมาณน้ำฝน โดยหัวมันสำปะหลัง 100 กรัม มีส่วนประกอบของน้ำ 60.21 - 75.32% เปลือก 4.08 - 14.08% เนื้อ (แป้ง) 25.87 - 41.88% และปริมาณของกรดไฮโดรไซยานิค 2.85 - 39.27 ppm (กล้าณรงค์ ศรีรอดและคณะ, 2542) ซึ่งเมื่อมาวิเคราะห์เป็นน้ำหนักแห้งเนื้อมัน พบว่ามีปริมาณแป้งสูงถึง 71.9 - 85.0 % เป็นส่วนประกอบของโปรตีน 1.57 - 5.78 % เส้นใย 1.77 - 3.98 % เถ้า 1.20 - 2.80 และไขมัน 0.06 - 0.43 % ซึ่งจะมีส่วนคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่แป้ง 3.59 - 8.66 % จากองค์ประกอบของหัวมันสด โดยมีองค์ประกอบทางเคมีแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.1 ปริมาณผลผลิตมันสำปะหลังในประเทศไทย

ปี	ผลผลิตหัวมันสด (ตัน)
2555/56	27,547,242
2554/55	26,601,090
2553/54	21,912,416
2552/53	22,055,740

ที่มา : มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย (2556)

ตารางที่ 2.2 ปริมาณส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังของประเทศไทยในแต่ละปี

ประจำปี	มันเส้น (ตัน)	มันอัดเม็ด (ตัน)	แป้งมันสำปะหลัง (ตัน)
2549/50	3,867,625	1,356,622	1,961,096
2550/51	1,253,729	2,021,591	2,127,110
2551/52	2,887,275	300,818	2,120,408
2552/53	5,137,317	235,250	2,603,115
2553/54	3,268,213	31,224	2,493,412
2554/55	4,453,061	48,988	2,784,961

ที่มา : มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย (2556)

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีในหัวมันสำปะหลังและในเนื้อมัน

องค์ประกอบในหัวมัน	ปริมาณ (กรัมต่อ100 กรัมน้ำหนักหัวมัน)
น้ำ	60.2 - 75.32
เปลือก	4.08 - 1.08
แป้ง (เนื้อ)	25.87 - 41.88
ไซยาไนด์ (ppm)	2.85 - 39.27
องค์ประกอบในเนื้อมัน	ปริมาณ (กรัมต่อ100 กรัมน้ำหนักแห้งเนื้อมัน)
แป้ง	71.19 - 85.0
โปรตีน	1.57 - 5.78
เยื่อใย	1.77 - 3.98
เถ้า	1.20 - 2.80
ไขมัน	0.06 - 0.43
คาร์โบไฮเดรตไม่ใช่แป้ง	3.59 - 8.66

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.2 อุตสาหกรรมมันสำปะหลัง

ปัจจุบันมันสำปะหลังได้เริ่มนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมมากขึ้น ทั้งการใช้ในประเทศและการแปรรูปเพื่อการส่งออก ขณะที่การบริโภคและใช้เป็นส่วนประกอบในอาหารเริ่มมีน้อยลง แม้ว่าในบางประเทศจะมีการบริโภคมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นก็ตาม ในขณะเดียวกันแนวโน้มการใช้มันสำปะหลังเป็นอาหารสัตว์น่าจะเพิ่มสูงขึ้นในอนาคต หลายประเทศได้เริ่มให้ความสนใจการพัฒนาอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องมากขึ้น เช่น อุตสาหกรรมอาหารสัตว์และแป้งมัน แม้ว่าบางส่วนยังไม่ประสบความสำเร็จแต่ก็ได้มีความพยายามที่จะพัฒนาเพื่อส่งเสริมการใช้มันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมมากขึ้น

2.2.1 อุตสาหกรรมมันเส้น (Cassava chips)

ประเทศไทยมีลานมันเส้นประมาณ 500 แห่ง และมักเป็นลานมันเส้นขนาดใหญ่ที่มีพื้นที่มากกว่า 50 ไร่ ส่วนลานมันเส้นขนาดกลางและเล็กมีน้อย โดยกำลังการผลิตของลานมันเส้นมีเฉลี่ยแห่งละประมาณ 120 - 150 ตัน/วัน โรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ตั้งในบริเวณใกล้สถานที่ปลูก โดยนำหัวมันลำเลียงไปยังเครื่องตัด จากนั้นนำไปตากให้แห้งบนลานซีเมนต์ประมาณ 2 - 3 วัน แต่ถ้าเป็นฤดูฝนจะใช้เวลาในการตากมันมากกว่าปกติ ซึ่งตามปกติแล้วการผลิตมันเส้น 1 กิโลกรัม ต้องใช้หัวมันสด (มีปริมาณแป้ง 25 เปอร์เซ็นต์) 2 - 2.5 กิโลกรัม เมื่อแห้งดีแล้วจะต้องได้มาตรฐานความชื้นที่มีในมันเส้นประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์ แล้วจึงทำการเก็บเพื่อส่งขายเป็นวัตถุดิบให้กับอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ และอุตสาหกรรมมันอัดเม็ดต่อไป

ปริมาณของมันเส้นที่ใช้เป็นอาหารสัตว์ในปี 2006 ประมาณ 100,000 ตัน และในปี 2008 มีปริมาณการผลิตมันเส้นเพิ่มขึ้นเป็น 1,000,000 ตัน ซึ่งคิดเป็นปริมาณหัวมันสดถึง 2.5 ล้านตัน ตลาดส่งออกมันเส้นที่สำคัญคือประเทศที่ไม่อยู่ในกลุ่มสหภาพยุโรป

2.2.2 อุตสาหกรรมมันอัดเม็ด (Cassava pellets)

อุตสาหกรรมมันอัดเม็ดเริ่มขึ้นหลังจากมีการส่งออกมันสำปะหลังไปยังสหภาพยุโรป เป็นการพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อปรับปรุงรูปร่างและขนาดตามความต้องการของผู้ซื้อ วิธีการผลิตมันสำปะหลังอัดเม็ดทุกแห่งไม่ว่าจะใช้เครื่องจักรจากต่างประเทศหรือในประเทศจะมีกรรมวิธีการผลิตเหมือนกัน กล่าวคือ ก่อนทำการอัดมันเส้นจะต้องนำมาร่อนเพื่อให้เศษที่เป็นผงและสิ่งเจือปนต่าง ๆ ออกเสียก่อน เสร็จแล้วแยกมันเส้นที่มีขนาดใหญ่มาตรฐานเข้าเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ ต่อจากนั้นมันเส้นที่ได้ขนาดและเกินขนาดที่ถูกบดแล้วจะถูกลำเลียงไปยังถังใส่บนเครื่องอัดก่อนส่งเข้าเครื่องอัด มันอัดเม็ดจะถูกพ่นน้ำเพื่อให้มีความชื้นในระดับที่เหมาะสม เมื่อออกจากเครื่องใหม่ ๆ มันอัดเม็ดจะยังอุ่น และอ่อนนุ่ม ต้องส่งเข้าเครื่องระบายความร้อนเพื่อลดอุณหภูมิและความชื้น

หลังจากนั้นมันอัดเม็ดจะมีความแข็ง การระบายความร้อนโดยทั่วไปจะใช้รางเลื่อนทั้งแบบตั้งและแบบนอนโดยการเป่าลม เมื่อมันอัดเม็ดเย็นตัวจะถูกส่งผ่านตะแกรงร่อน เพื่อคัดมันอัดเม็ดที่ใหญ่เกินขนาดก่อนส่วนมันอัดเม็ดที่เล็กเกินไปจะถูกส่งเข้าไปอัดใหม่ ลมจากพัดลมที่ใช้เป่ามันอัดเม็ดจะมีกำลังแรงมากเมื่อเวลาพัดผ่านมันอัดเม็ดจะทำให้มันอัดเม็ดพุ่งเข้าไปกองในถังใบใหญ่ ส่วนผงมันที่ปลิวไปกับลมจะถูกส่งเข้าสู่เครื่องป้อนอีกครั้ง

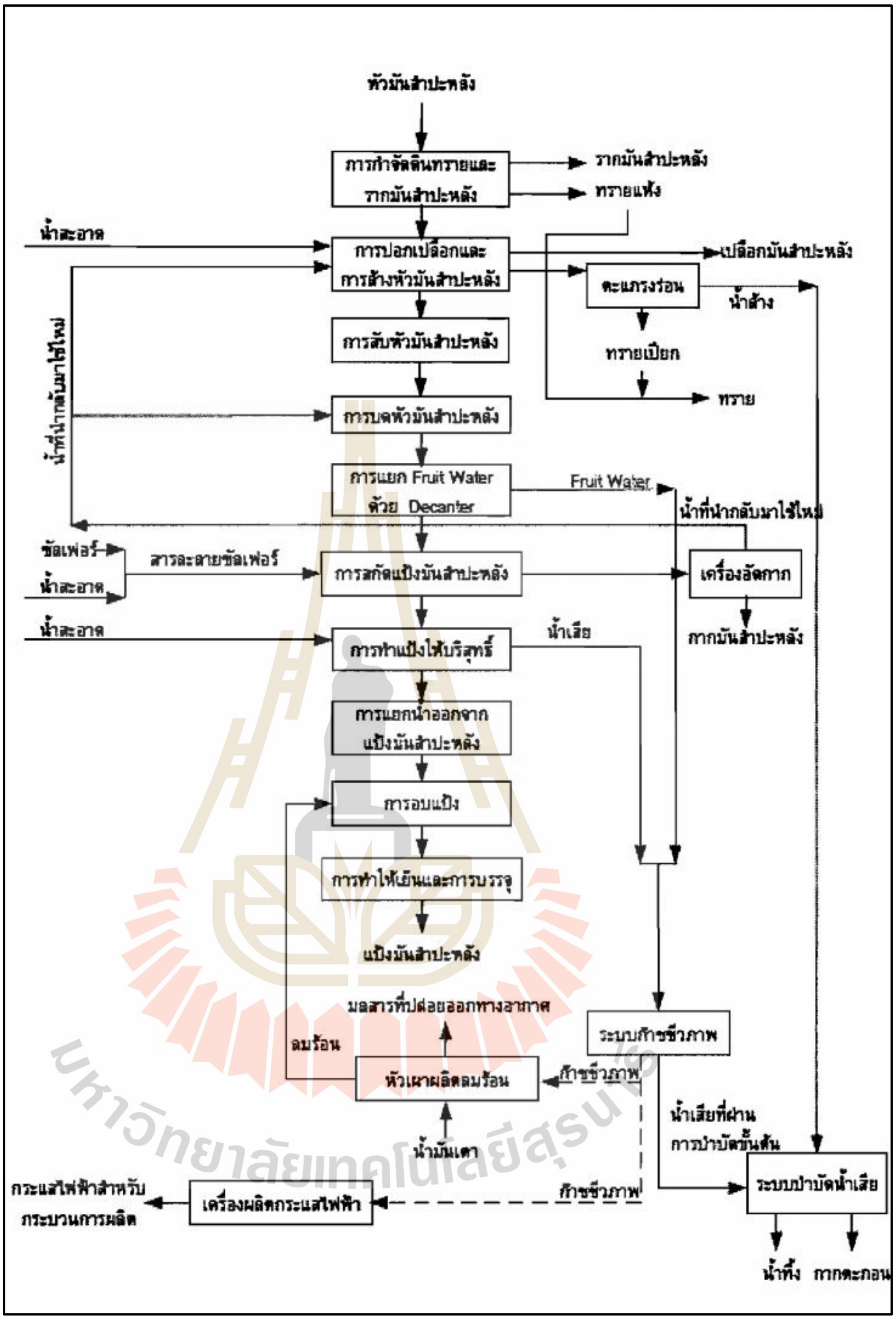
ในการผลิตมันอัดเม็ดจะพิจารณาถึงคุณภาพของมันเส้นเป็นหลัก โดยมาตรฐานของมันเส้นที่จะไปใช้เป็นวัตถุดิบนั้นมีปริมาณความชื้นไม่เกิน 16 % และปริมาณทรายไม่เกิน 4 % ซึ่งในประเทศไทยนั้นมีโรงงานอัดเม็ดประมาณ 200 โรงงาน โรงงานที่มีจำนวนหัวอัดต่ำกว่า 5 หัว มีน้อย ส่วนใหญ่แต่ละโรงงานจะมีหัวอัด 6 - 10 หัว กำลังการผลิตรวมทั่วทุกโรงงานเดินเครื่อง 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 12 เดือน มีความสามารถในการผลิตประมาณ 10 ล้านตัน/ปี แต่ในการผลิตจริงแต่ละโรงงานจะเดินเครื่องเพียง 4 - 5 เดือน เท่านั้น

2.2.3 อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch)

หัวมันสำปะหลังที่ได้คุณภาพจะนำเข้าสู่ตะแกรงร่อนดินทราย เพื่อกำจัดดินทรายที่ติดมากับหัวมันสำปะหลังและทำให้ผิวนอกของหัวในหลุดออก ของเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นอยู่ในรูปของแข็งได้แก่ รากมันและทราย หัวมันสำปะหลังจะถูกส่งผ่านสายพานหรือเครื่องยกจากตะแกรงร่อนดินทรายไปยังเครื่องปอกเปลือกและเครื่องล้างหัวมันสำปะหลัง ในการปอกเปลือกใช้เครื่องแยกที่มีรอบการหมุนสูงจะแยกเปลือกและสิ่งเจือปนต่าง ๆ ได้แก่ ทรายที่ยังหลงเหลืออยู่ หิน และโลหะ ออกจากหัวมันสำปะหลัง จากนั้นจะใช้วิธีฉีดพ่นน้ำเป็นฝอยเพื่อทำความสะอาดหัวมันสำปะหลังที่ปอกเปลือกแล้วหัวมันสำปะหลังที่สะอาดจะถูกส่งไปยังเครื่องสับโดยใช้สายพานต่อเนื่อง หรือบางโรงงานอาจใช้เครื่องตักหัวมัน เครื่องสับจะสับหัวมันสำปะหลังให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ ขนาดประมาณ 1 - 2 นิ้ว ชิ้นมันสำปะหลังที่ถูกสับแล้วจะตกเข้าสู่เครื่องบดมัน เพื่อให้ได้หัวมันสำปะหลังที่เป็นเม็ดละเอียดในขั้นตอนการสกัดแป้ง จะเป็นการแยกแป้งออกจากเซลลูโลส ซึ่งได้แก่ เส้นใยและกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องสกัดที่ต่ออนุกรม น้ำแป้งข้นจะผ่านเข้าสู่เครื่องกรองหมุนเหวี่ยงรูปกรวย ซึ่งมีการพ่นน้ำเข้ามาในทิศทางสวนทางกับการไหลของน้ำแป้ง เพื่อให้เกิดการแยกตัวระหว่างแป้งกับเส้นใย น้ำที่ใช้นี้เป็นน้ำที่เกิดจากขั้นตอนการทำแป้งให้บริสุทธิ์ ในขั้นตอนนี้มีการเติมน้ำกำมะถันเพื่อยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ ที่จะเปลี่ยนโมเลกุลของแป้งเป็นกรดแลคติค กากมันสำปะหลังจากขั้นตอนการสกัดแป้งจะมีน้ำอยู่ในปริมาณมากถึงร้อยละ 90 - 95 และมีปริมาณแป้งน้อยมาก จึงมีการแยกออกจากน้ำแป้งโดยใช้เครื่องอัดกากและถูกนำไปตากแดดบนพื้นซีเมนต์ น้ำแป้งข้นจะถูกแยกน้ำออก และส่งเข้าเครื่องอบโดยใช้ตัวส่งที่มีลักษณะเป็นเกลียว เครื่องอบจะเป็น Pneumatic Flash Dryer ซึ่งทำให้เกิดการระเหยโดยใช้ลมร้อนอุณหภูมิประมาณ

200 องศาเซลเซียส แป้งที่ยังร้อนอยู่นี้จะถูกแยกต่อไปโดยใช้ไซโคลน หลังจากนั้นแป้งจะเข้าสู่ขั้นตอนการบรรจุถุงเพื่อส่งขายต่อไป ส่วนของน้ำเสียเข้าสู่กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.1โดยก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จะมีการนำกลับมาใช้ในส่วนของการอบแป้งและผลิตกระแสไฟฟ้า (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.3 องค์ประกอบในกากมันสำปะหลัง (Cassava pulp)

กากมันสำปะหลังเป็นวัสดุเหลือทิ้งประเภทของแข็งที่มีปริมาณมากที่สุดจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง โดยกากมันสำปะหลังที่ได้จากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังจะมีลักษณะเป็นเนื้อละเอียด สีขาวหรือสีเหลืองอ่อนๆ จับตัวกันเป็นก้อนๆ เนื่องจากมีความชื้นสูงประมาณ 75 - 80 % โดยกากมันสำปะหลังยังคงมีปริมาณแป้งอยู่ปริมาณร้อยละ 50 - 60 ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งแป้งในส่วนนี้จะอยู่ในลิกโนเซลลูโลส และเพคตินของเซลล์พืช และมีองค์ประกอบของเซลลูโลสและเส้นใยอยู่ร้อยละ 10 - 15 โปรตีนร้อยละ 1.5 - 5 และไขมันร้อยละ 0.1 - 4 โดยน้ำหนัก (ตารางที่ 2.4) นอกจากนี้ยังมีแร่ธาตุในปริมาณที่ต่ำ ซึ่งประกอบไปด้วยธาตุ Fe^{2+}, Mn^{2+}, Mg^{2+}, Cu^{2+} และ Zn^{2+} อยู่ในปริมาณ 155, 40, 1100, 4 และ 21 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมกากมันสำปะหลังแห้ง ตามลำดับ (วรินธร สงคศิริ, 2553)

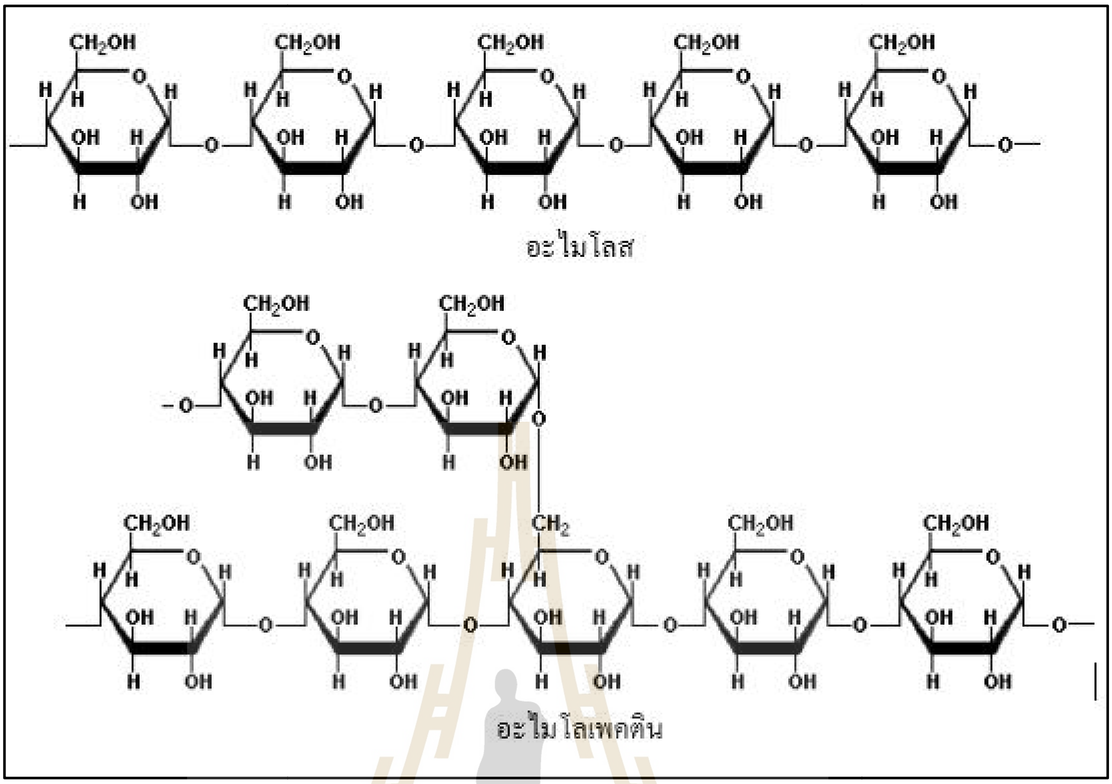
ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของกากมันสำปะหลัง (น้ำหนักแห้ง)

Components	Kosugi *et al.*, 2009	Rattanachomsri *et al.*, 2009	Sriroth *et al.*, 2010	Ali *et al.*, 2011
Starch	68.8	60.1	68.89	65.6
Fiber	28.1	23	27.75	20.1
Cellulose	-	15.6	-	8.1
Lignin	2.2	2.8	-	2.2
Protein	2.49	-	1.55	3.1

2.3.1 แป้ง (Starch)

แป้ง คือผลผลิตสุดท้ายของกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช โดยทั่วไปแป้งคือแหล่งพลังงานสะสมของพืช พบมากในพืชประเภทหัว เช่น เผือกและมัน ตามสูตรโครงสร้างแป้งประกอบด้วย 2 ส่วน คือส่วนที่เรียกว่า อะไมโลส (Amylose) เป็นสายของกลูโคสที่ต่อกันเป็นพันธะไกลโคไซด์ชนิด α1- 4 มีประมาณ 15 - 20% ส่วนที่สองคือ อะไมโลเพคติน (Amylopectin) ซึ่งมีโครงสร้างที่เป็นแขนง เนื่องจากมีพันธะไกลโคไซน์แบบ α1 - 6 มีประมาณ 80 - 85% แสดงในรูปที่ 2.2

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน
ที่มา : Chaplin (2001)

2.3.2 เส้นใย (Fiber)

กากมันสำปะหลังมีองค์ประกอบที่มีปริมาณเส้นใยสูง โดยเส้นใยเหล่านี้จะทำให้การย่อยสลายของจุลินทรีย์ทำงานได้น้อยลง เส้นใยในกากมันสำปะหลังส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน (Rattanachomsri, Tanapongpipat, Eurwilaichirt and Champreda, 2009; Suksombut et al. 2006; Ali, Soewarno, Sumarno, Primarini and Sumaryono, 2011) อย่างไรก็ตามสัดส่วนเส้นใยที่อยู่ในกากมันสำปะหลังยังมีความแปรปรวนอยู่ ซึ่งอาจมาจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่ ลักษณะสายพันธุ์ อายุและคุณภาพของหัวมันสำปะหลังสด หรือสภาพดินที่ปลูก วิธีการเก็บเกี่ยว และกระบวนการสกัดแป้งมันสำปะหลังที่แตกต่างกัน (Sriroth, Santisopasri, Petchalanuwat, Kurotjanawong and Oates., 1999) ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ชนิดเส้นใยในกากมันสำปะหลัง (น้ำหนักแห้ง)

Components	Khempaka et al., 2009	Rattanachomsri et al., 2009	Suksombut et al., 2006	Ali et al., 2011
Fiber	13.60	23	6.60	20
Cellulose	-	15.60	5.90	8.1
Hemicellulose	-	4.60	27.80	2.80
Lignin	-	2.80	3.90	2.20

2.4 การใช้ประโยชน์กากมันสำปะหลัง

การใช้ประโยชน์กากมันสำปะหลังส่วนใหญ่ที่ได้มาจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังจะถูกจำหน่ายออกเพื่อนำไปผลิตเป็นอาหารสัตว์ โดยการนำไปใช้นั้นต้องทำการตากให้แห้ง ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้วิธีการตากลาน และนอกจากการนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตอาหารสัตว์แล้วอาจมีการนำไปใช้ในการผลิตพลังงานทดแทน เช่น การผลิตแก๊สชีวภาพ การผลิตเอทานอล และการผลิตเชื้อเพลิงแข็ง (เชื้อเพลิงชีวมวล)

2.4.1 การใช้ประโยชน์กากมันสำปะหลังในการผลิตอาหารสัตว์

ไพบูลย์ แดงท่าขาม, (2551) ได้ศึกษาการใช้กากมันสำปะหลังเป็นแหล่งพลังงานในการขุนโคนมลูกผสมเพศผู้ ซึ่งผลการศึกษาพบว่าสามารถใช้กากมันสำปะหลังทดแทนมันสำปะหลังในสูตรอาหารข้นสำหรับโคนมลูกผสมเพศผู้ได้ถึงร้อยละ 100 โดยไม่ส่งผลต่อสมรรถนะการผลิตของโคนมลูกผสมเพศผู้ ดังนั้นจึงเป็นทางเลือกหรือในการช่วยลดต้นทุนการผลิตให้กับเกษตรกรได้

สุทิศา เข็มผะกา, (2553) ได้นำกากมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์สำหรับไก่เนื้อ โดยการนำกากมันสำปะหลังมาเป็นวัตถุดิบผสมในอาหารสำหรับเลี้ยงไก่เนื้อ พร้อมทั้งได้มีการใช้เชื้อจุลินทรีย์ Aspergillus oryzae และ Candida utilis หมักกากมันสำปะหลัง เพื่อเป็นการเพิ่มโปรตีนและอะมิโนไนโตรเจนของกากมันสำปะหลัง ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า กากมันสำปะหลังสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานในอาหารไก่เนื้อได้จนถึงระดับ 8 % และโดยเฉพาะอย่างยิ่งการผสมกากมันสำปะหลังที่ผ่านการหมักด้วยเชื้อดังกล่าวสามารถใช้เป็นแหล่งโปรตีนที่ดีสำหรับสัตว์ได้

2.4.2 การใช้ประโยชน์กากมันสำปะหลังในการผลิตแก๊สชีวภาพ

กิติยาพร สมบูรณ์, (2554) นำกากมันสำปะหลังมาทำการผลิตแก๊สชีวภาพ โดยศึกษาผลของการใช้เอนไซม์ผสมเซลลูเลสและเพคติเนสในการเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สชีวภาพ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าค่าพีเอชเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเปลี่ยนกากมันสำปะหลังเป็นน้ำตาลรีดิวซ์มากที่สุด โดยสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง คือการหมักย่อยสารละลายกากมันสำปะหลังที่พีเอช 3 เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยเอนไซม์เซลลูโลส 5 NCU และเพคติเนส 200 PGU ต่อกรัมกากแห้ง ตามลำดับ ซึ่งสามารถเพิ่มปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และปริมาณกรดไขมันระเหยมากกว่าปริมาณตั้งต้นถึง 10 และ 15 เท่า ตามลำดับ และในส่วนของการผลิตแก๊สชีวภาพพบว่าการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ก่อนนำไปหมักแก๊สชีวภาพสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพได้อย่างมีนัยสำคัญ

กิตติกานท์ สุขวาณิชย์, (2554) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยกรดและด่างที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพ โดยประเมินจากค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยที่มีผลกับประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพ ผลการศึกษาพบว่า การไฮโดรไลซิสด้วยกรดที่ค่าพีเอช 0 อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และใช้เวลา 90 นาที ทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และกรดไขมันระเหยถึง 214 และ 20 เท่าจากระดับเริ่มต้น ซึ่งให้ผลดีกว่าการไฮโดรไลซิสด้วยด่างอย่างมาก ในส่วนของการผลิตแก๊สชีวภาพ พบว่ากากมันสำปะหลังที่ผ่านการไฮโดรไลซิสด้วยด่างที่พีเอช 13 อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ทำให้ได้ปริมาณแก๊สชีวภาพสูงเป็น 3 เท่า เมื่อเทียบกับการผลิตแก๊สชีวภาพจากกากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการไฮโดรไลซิส และให้ผลดีกว่าการผลิตแก๊สชีวภาพจากการใช้กากมันสำปะหลังที่ผ่านการไฮโดรไลซิสด้วยกรด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.5 กระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบไร้อากาศ

กระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.3

2.5.1 ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

เป็นขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน จะถูกแบคทีเรียย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์ให้กลายเป็นโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน เพื่อใช้ในกระบวนการสร้างกรด แบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายคือ แบคทีเรียจำพวกแฟคคัลเททีฟแอนแอโรบิคแบคทีเรีย

2.5.2 อะซิโดเจนนิซิส (Acidogenesis)

ผลผลิตในขั้นตอนการไฮโดรไลซิสจะถูกแบคทีเรียสร้างกรดนำมาใช้เป็นอาหารและเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่าย ได้แก่ กรดอะซิติก กรดโพรไพโอนิก กรดบิวทิริก แก๊สไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งผลผลิตเหล่านี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารอาหารและความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจน

2.5.3 อะซิโตเจนนิซิส (Acetogenesis)

ผลผลิตจากขั้นตอนอะซิโดเจนิซิสไม่สามารถผลิตแก๊สมีเทนโดยตรงได้ ดังนั้นกรดไขมันระเหยง่ายที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม เช่น โพรไพออเนท บิวทิเรท ถูกแบคทีเรียย่อยสลายผลผลิตที่ได้ประกอบไปด้วย กรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน

2.5.4 เมทาโนเจนนิซิส (Methanogenesis)

กรดอะซิติกและไฮโรเจนถูกแบคทีเรียที่ใช้สร้างมีเทน กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ไม่สามารถถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สมีเทนได้ การเกิดแก๊สมีเทนเกิดได้ 2 แบบ แบบแรกคือ เกิดจากการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ไปเป็นแก๊สมีเทน ซึ่งแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนนี้มีปริมาณเป็น 70 % และอีกส่วนหนึ่งจะเกิดจากการรีดิวซ์แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนให้กลายเป็นมีเทน

จะเห็นได้ว่ากระบวนบำบัดแบบไร้อากาศจะต้องอาศัยการทำงานร่วมกันของแบคทีเรียหลาย ๆ กลุ่มดังที่กล่าวมาแล้ว โดยความสามารถในการย่อยสลายของแต่ละกลุ่มก็จะมีผลซึ่งกันและกัน ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการผลิตแก๊สมีเทน

2.5.5 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ

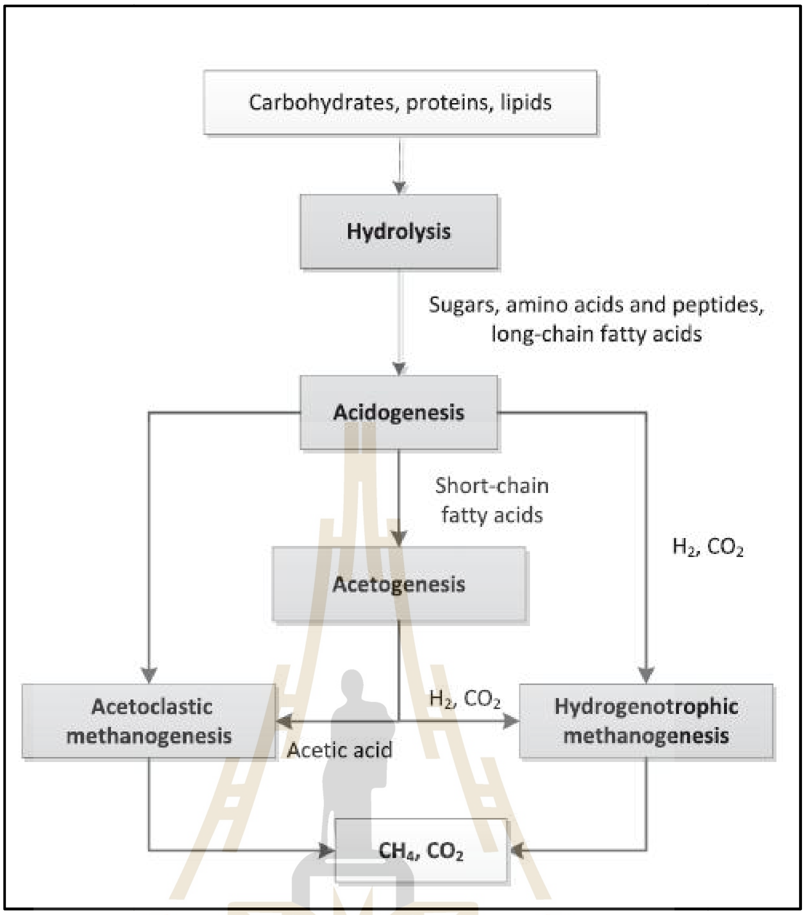
ข้อดี

1) ประหยัดพลังงาน และไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเติมอากศ
2) มีการสร้างเซลล์จุลินทรีย์ต่ำกว่ากระบวนการบำบัดแบบใช้อากาศ 3 - 20 เท่า
3) ผลผลิตที่ได้คือแก๊สมีเทน ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้
4) เหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง ๆ

ข้อเสีย

1) เป็นกระบวนการที่ใช้เวลานานโดยเฉพาะตอนเริ่มต้นกระบวนการ
2) ต้องการผู้ควบคุมระบบที่มีความรู้และมีประสบการณ์ในการดำเนินการ
3) อาจลงทุนสูงสำหรับน้ำเสียที่มีความสกปรกน้อย
4) หากระบบล้มเหลวอาจส่งกลิ่นเหม็นได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



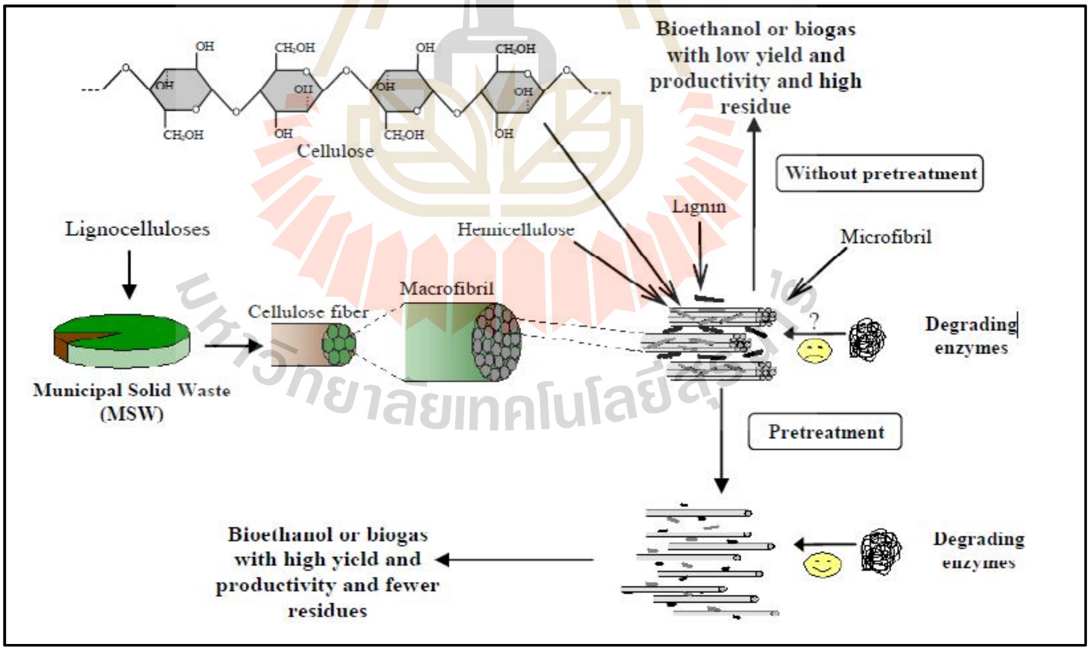
รูปที่ 2.3 ขั้นตอนในกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ

ที่มา : (Li y. et al., 2011)

2.6 กระบวนการย่อยสลายขั้นต้น (Pretreatment)

กระบวนการย่อยสลายขั้นต้นมีวัตถุประสงค์เพื่อ กำจัดลิกนินซึ่งมีสมบัติไปห่อหุ้มหรือเคลือบโครงสร้างของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสออกไป (Ververis et al., 2007) ลิกนินจึงเป็นเหมือนผนังป้องกันไม่ให้จุลินทรีย์ย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส นอกจากนี้ยังมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มขนาดรูพรุนของตัววัตถุดิบและลดการเกิดผลึกของเซลลูโลส (cellulose crystallinity) ทำให้เอนไซม์สามารถเข้าถึงวัตถุดิบได้ง่ายขึ้น (Sun and Cheng , 2002) อีกทั้งยังช่วยลดค่าใช้จ่ายสำหรับเอนไซม์ในการย่อยเซลลูโลส เนื่องจากใช้เอนไซม์ในการย่อยเพียงอย่างเดียวโดยไม่มีการปรับสภาพวัตถุดิบก่อนจะมีค่าใช้จ่ายสำหรับเอนไซม์ถึง 25 % ของต้นทุนการผลิต (Brodeur et al., 2011) การศึกษาการย่อยสลายขั้นต้นวัสดุชีวมวลให้ดีขึ้นเพื่อผลผลิตมีเทนและเอทานอล มีงานวิจัยมากมายเกี่ยวกับการย่อยสลายขั้นต้นด้วยวิธีที่แตกต่างกันเพื่อการย่อยสลายที่ดีขึ้นโดยที่วัสดุ

ประเภทชีวมวลนั้นมีส่วนประกอบ 3 ชนิดเป็นหลัก คือ1) เซลลูโลส คือ หน่วยย่อยของกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β 1 - 4 ไกลโคซิดิก การรวมตัวของเซลลูโลสมีรูปแบบที่เรียกว่าเส้นใย หรือกลุ่มที่เรียกว่าเซลลูโลส 2) เฮมิเซลลูโลส คือ โครงสร้างของคาร์โบไฮเดรต ประกอบด้วยโพลิเมอร์ที่แตกต่างกัน เช่น เพนโตส เฮกโซส และกรดน้ำตาล โดยมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าเซลลูโลสและสั้นกว่า ซึ่งย่อยสลายได้ง่ายกว่าเฮมิเซลลูโลสมีหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างเซลลูโลสและลิกนินทำให้เป็นเครือข่ายที่แข็งแรง การละลายของเฮมิเซลลูโลสจะได้ส่วนประกอบที่แตกต่างกันไป เช่น แมนโนส ไซโลส กลูโคส อาราบิโนส และกาแลกโตส 3) ลิกนิน คือ ส่วนประกอบหนึ่งที่มีในผนังเซลล์ โดยเป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์ต่างชนิดกันไม่เป็นผลึก ทำให้พืชมีโครงสร้างที่น้ำซึมผ่านไม่ได้และป้องกันการย่อยสลายจากจุลินทรีย์หรือการออกซิเดชั่น การจะเพิ่มประสิทธิภาพผลผลิตเอทานอลหรือมีเทนนั้นจึงต้องมีการจัดการโครงสร้างที่สลับซับซ้อนออกเพื่อให้เอนไซม์สามารถเข้าถึงได้ง่าย ซึ่งจากคุณสมบัติข้างต้นนั้นแล้วทำให้วัสดุชีวมวลทนต่อการย่อยสลายโดยจุดมุ่งหมายของการย่อยสลายขั้นต้นคือเปลี่ยนคุณสมบัติเหล่านี้ให้ย่อยสลายขึ้นโดยเอนไซม์ แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วัตถุประสงค์ของการย่อยสลายขั้นต้น

ที่มา : Taherzadeh and Karimi, (2008)

ด้วยคุณสมบัติของวัสดุชีวมวลมีความสลับซับซ้อนของโครงสร้างจึงไม่ง่ายต่อการย่อยสลายขั้นต้นอย่างใดอย่างหนึ่ง ตัวอย่าง เช่น ใบข้าวโพดใช้การย่อยสลายขั้นต้นด้วยกรดเจือจางมีแนวโน้มต่อประสิทธิภาพที่ดีแต่วิธีนี้ไม่มีประสิทธิภาพต่อฟางข้าวโพด ผลึกของเซลลูโลสที่ใช้ประโยชน์ได้ถูกจำกัดด้วยพื้นที่ผิวโดยลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส ซึ่งปัจจัยดังกล่าวมีผลต่ออัตราการย่อยสลาย และผลของการย่อยสลายขั้นต้นด้วยเอนไซม์ (Hendriks and Zeeman, 2009) โดยกระบวนการย่อยสลายขั้นต้นที่สำคัญจะประกอบไปด้วย 1) กระบวนการทางกล 2) กระบวนการทางความร้อน 3) กระบวนการทางเคมี 4) กระบวนการแบบอื่น ๆ

2.6.1 กระบวนการทางกล

ในการย่อยสลายขั้นต้นทางกลมีจุดมุ่งหมายเพื่อทำการลดขนาดของวัสดุรวมทั้งลดความเป็นผลึก เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวและลดระดับความเป็นพอลิเมอร์ลง (Alvera et al., 2010) ทั้งนี้กระบวนการย่อยสลายขั้นต้นทางกลประกอบด้วย การสับ (chipping) การบด (grinding) หรือการโม่ (milling) โดยปกติขนาดของวัสดุที่ถูกย่อยขั้นต้นแล้วจะมีขนาดแตกต่างกันตามกระบวนการ อาทิ ขนาด 10 - 30 มิลลิเมตร (การสับ), 0.2 - 2 มิลลิเมตร (การโม่หรือการบด) (Sun and Cheng, 2002) การลดขนาดนี้จะทำให้ความสามารถในการนำไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบอื่นเป็นไปได้ง่าย ซึ่งพบว่าการสับย่อยให้มีขนาดเล็กลงจะช่วยให้สามารถเพิ่มอัตราการย่อยสลาย (Degradability) ได้อย่างมีนัยสำคัญ (Sarnklong et al., 2010.; Shen et al., 1998; Abou-El-Enin et al., 1999; Vadiveloo, 2000; 2003) Taherzadeh and Karimi (2008) ได้ทดสอบการย่อยสลายขั้นต้นวัสดุจำพวก lignocelluloses ด้วยวิธีการโม่ในรูปแบบต่าง ๆ อาทิ ball milling, two - roll milling, hammer milling, colloid milling และ vibro energy milling พบว่าสามารถทำให้เอนไซม์เข้าทำการไฮโดรไลซิสได้ดีขึ้น Mshandete et al., (2006) ได้ทำการทดสอบถึงขนาดของวัสดุที่เล็กลงและการเพิ่มพื้นที่ผิว ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพได้สูงขึ้น โดยพบว่าขนาดของวัสดุที่เล็กลงจะทำให้กระบวนการไฮโดรไลซีสได้ง่ายขึ้นและทำให้ขั้นตอนของการสร้างกรดเกิดการสารละลายอินทรีย์ระเหยง่าย (VFAs)ได้สูงขึ้นทำให้สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้สูงขึ้น Izumi et al., (2010) ได้ทำการศึกษาผลของการลดขนาดและความสามารถในการละลายน้ำในการผลิตแก๊สชีวภาพ โดยใช้กระบวนการ Bead milling พบว่าสามารถเพิ่มความสามารถในการละลายน้ำได้สูงถึงร้อยละ 30 ซึ่งข้อดีของการย่อยสลายขั้นต้นทางกลที่เห็นได้ชัดคือ ไม่เกิดกลิ่นรบกวนจากการทำปฏิกิริยาของสารเคมีต่าง ๆ ไม่มีการเกิดสารประกอบเฟอร์ฟิวรัลและไฮดรอกซี่เมททิลเฟอฟิวรัล ง่ายต่อการนำไปใช้จริง และความสิ้นเปลืองการใช้พลังงานอยู่ในระดับที่เหมาะสม (Torecii et al., 2009: Perez- Elvira et al., 2006) โดยการย่อยสลายขั้นต้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ทางกลจะใช้พลังงานมากน้อยขึ้นกับขนาดสุดท้ายของวัสดุที่จะนำมาลดขนาดและองค์ประกอบของวัสดุนั้น ๆ (Cesaro and Belgion, 2014)

2.6.2 กระบวนการทางความร้อน

2.6.2.1 การระเบิดด้วยไอน้ำ (Stream explosion)

การระเบิดด้วยไอน้ำ (stream explosion) ชีวมวลที่ผ่านการหั่นและบดแล้วจะถูกย่อยสลายขั้นต้นต่อด้วยไอน้ำอิ่มตัวที่ความดันสูง หลังจากนั้นจึงลดความดันลง โดยส่วนใหญ่จะควบคุมอุณหภูมิที่ 160 - 260 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 0.69 - 4.83 เมกะพาสคาล (MPa) ไว้ระยะหนึ่ง หลังจากนั้นจึงลดความดันลงให้เหลือเท่ากับความดันบรรยากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสและการเปลี่ยนรูปลิกนิน เนื่องจากอุณหภูมิสูงและเป็นการเพิ่มศักยภาพในการย่อยเซลลูโลสด้วย ปัจจัยที่มีผลต่อการระเบิดด้วยไอน้ำ ได้แก่ ระยะเวลา อุณหภูมิ และขนาดของชิ้นชีวมวล (Pejo et al., 2008) ข้อดีของวิธีนี้ คือ ใช้พลังงานต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับการบดด้วยเครื่องจักรเพียงอย่างเดียว มีความคุ้มค่าเมื่อใช้ในการย่อยสลายขั้นต้นไม้เนื้อแข็งและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร แต่มีประสิทธิผลน้อยเมื่อใช้กับไม้เนื้ออ่อน ข้อจำกัดของวิธีการนี้ คือ การทำลายส่วนประกอบของไซแลน (xylan) ซึ่งเป็นพอลิแซคคาไรด์พบอยู่ในผนังเซลล์ของพืชและก่อให้เกิดสารองค์ประกอบที่อาจไปขัดขวางการทำงานของจุลินทรีย์ที่ใช้ในกระบวนการต่อจากนี้ (Cheng, 2009)

2.6.2.2 การระเบิดด้วยแอมโมเนีย (Ammonia fiber explosion, AFEX)

การระเบิดด้วยแอมโมเนีย (ammonia fiber explosion, AFEX) การทำให้ชีวมวลสัมผัสกับแอมโมเนียเหลวที่อุณหภูมิที่ความดันสูงในระยะเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นจึงลดความดันลง โดยมีตัวแปร 4 ตัวสำคัญ ในการปรับสภาวะของวิธีนี้ให้มีประสิทธิผล ได้แก่ ภาระบรรทุกแอมโมเนีย ภาระบรรทุกน้ำ อุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาโดยทั่วไปกระบวนการ AFEX จะใช้แอมโมเนียเหลวประมาณ 1 - 2 กิโลกรัมแอมโมเนียต่อกิโลกรัมชีวมวลแห้ง ที่อุณหภูมิ 60 - 120 องศาเซลเซียส และความดัน 1.72 - 2.06 เมกะพาสคาล เป็นเวลา 30 นาที (Kumaret al., 2009) กระบวนการนี้สามารถช่วยเพิ่มอัตราการเปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาล อย่างไรก็ตาม กระบวนการนี้มีประสิทธิผลน้อยเมื่อใช้ย่อยสลายขั้นต้นชีวมวลที่มีองค์ประกอบของลิกนินสูง เช่น หนังสือพิมพ์ (มีลิกนิน 18 - 30%) เศษไม้ (มีลิกนิน 25 - 35%) นอกจากนี้พบว่ากระบวนการ AFEX มีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการระเบิดด้วยไอน้ำ (Cheng, 2009)

2.6.3 กระบวนการทางเคมี

2.6.3.1 การย่อยสลายด้วยโอโซน (Ozonolysis)

โอโซนสามารถย่อยสลายลิกนินและเฮมิเซลลูโลสในวัตถุดิบพวกลิกโนเซลลูโลสได้ เช่น ฟางข้าวสาลี ชานอ้อย หญ้า พืชถั่ว ไม้สน ก๊าซโอโซนเป็นสารออกซิแดนท์ที่ดีสามารถละลายน้ำได้ สามารถเข้าไปแตกโครงสร้างของลิกนินและปลดปล่อยสารประกอบที่ละลายน้ำได้และมีน้ำหนักโมเลกุลน้อย เช่น กรดอะซิติก กรดฟลอมิก (Balat et al., 2011) ประสิทธิภาพการย่อยสลายชีวมวลด้วยเอนไซม์จะเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านการย่อยสลายขั้นต้นด้วยโอโซน ข้อดีของวิธีนี้คือ 1) มีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน 2) ไม่ผลิตสารตกค้างที่เป็นพิษต่อกระบวนการต่อไป 3) ปฏิกิริยาสามารถดำเนินได้ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันห้อง อย่างไรก็ตาม ต้องใช้โอนโซนปริมาณมากในกระบวนการย่อยสลายขั้นต้นทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง (Cheng, 2009)

2.6.3.2 การย่อยสลายด้วยกรด (Acid hydrolysis)

กรดที่นิยมใช้ ได้แก่ กรดซัลฟูริก และกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งเดิมเคยใช้กรดเข้มข้นในการย่อยสลายขั้นต้นลิกโนเซลลูโลส แต่เนื่องจากกรดเข้มข้นเหล่านี้มีฤทธิ์กัดกร่อน มีความเป็นพิษและเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมจึงจำเป็นต้องใช้ถังปฏิกิริยาที่ทนทานต่อการกัดกร่อนและมีค่าใช้จ่ายในการคืนสภาพของกรดนั้นสูงมาก ดังนั้นจึงใช้การเจือจางกรดในการย่อยสลายขั้นต้นพบว่ามีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายเซลลูโลสได้ การย่อยสลายขั้นต้นด้วยการเจือจางกรด แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ การเจือจางกรดที่อุณหภูมิสูง (> 160 องศาเซลเซียส) และการเจือจางกรดที่อุณหภูมิต่ำ (< 160 องศาเซลเซียส) (Jung et al., 2013) ได้ศึกษาการย่อยสลายขั้นต้นทลายปาล์มเปล่าด้วยวิธีการเจือจางกรด พบว่าวิธีการนี้มีประสิทธิผลมากโดยใช้กรดซัลฟูริก 1% (w/v) ทำปฏิกิริยาภายในเวลา 3 นาที ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และทำการย่อยในไมโครเวฟ ถึงแม้ว่าการย่อยสลายขั้นต้นด้วยกรดจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยเซลลูโลสได้ แต่ถ้าพิจารณาในเรื่องค่าใช้จ่ายพบว่ามีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าการย่อยสลายขั้นต้นทางกลร่วมกับเคมี นอกจากนี้จำเป็นต้องปรับ pH ให้เป็นกลางก่อนหลังจากทำการย่อยสลายขั้นต้น เพื่อไม่ให้ขัดขวางการทำงานของกระบวนการในขั้นตอนต่อไป

2.6.3.3 การย่อยสลายด้วยด่าง (Alkaline hydrolysis)

โซเดียมไฮดรอกไซด์และปูนขาวเป็นสารเคมีที่นิยมใช้ในกระบวนการย่อยสลายขั้นต้นด้วยด่าง ซึ่งด่างเหล่านี้สามารถแตกโครงสร้างของลิกนินและลดการเกิดผลึกของเซลลูโลส (Sun and Cheng, 2002) การย่อยสลายขั้นต้นด้วยด่างเป็นกระบวนที่ง่ายและไม่ต้องใช้พลังงานมากเมื่อเปรียบเทียบการย่อยสลายขั้นต้นด้วยกรด (นันทิกา และคณะ, 2554) รายงานว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำให้ปริมาณของเซลลูโลสเพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาณเฮมิเซลลูโลสและลิกนินลดลง นอกจากนี้ (Chen et al., 2012) พบว่า 70% ของเฮมิเซลลูโลสถูกกำจัดภายใน 4 สัปดาห์ ภายใต้การปรับสภาพด้วยด่างที่สภาวะอุณหภูมิห้อง และการใช้เอนไซม์ชนิดผสม

หลังจากการปรับสภาพวัตถุดิบด้วยด่างแล้วสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายชีวมวลได้อย่างมีนัยสำคัญ

2.6.3.4 การย่อยสลายออกซิเดชัน (Oxidative delignification)

การกำจัดลิกนินโดยการออกซิเดชัน (oxidative delignification) การย่อยสลายด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ขั้นต่อไปนี้ได้ (Oliva et al., 2005) พบว่าปฏิกิริยาเฟนตัน [ปฏิกิริยาระหว่างเหล็ก (Fe) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคอล (OH)] สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการหมักวัตถุดิบที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นด้วยการระเบิดด้วยไอน้ำ เนื่องจากปฏิกิริยาเฟนตันสามารถย่อยสลายสารประกอบที่เป็นพิษที่เกิดขึ้นได้ เช่น ฟูแรน (furan) ฟีนอลิก (phenolic) (Jain and Vigneshwaran, 2012) ได้ศึกษาผลของการปรับสภาพเซลลูโลสด้วยสารละลายเฟนตัน พบว่าปฏิกิริยาเฟนตันที่เกิดขึ้นมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายวัตถุดิบให้มีสภาพที่เอนไซม์สามารถเข้าถึงและย่อยสลายได้ดี นอกจากนี้ (Sinnaraprasat and Fongsatitkul, 2011) พบว่าปฏิกิริยาเฟนตันภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง (28 - 30 องศาเซลเซียส) ที่อัตราส่วนระหว่าง H_2O_2 : Fe^{2+} เท่ากับ 20 และ COD : H_2O_2 เท่ากับ 130 สามารถย่อยสลายน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มดิบซึ่งมีองค์ประกอบของพวกคาร์โบไฮเดรตและให้ปริมาณน้ำตาลที่สามารถนำไปหมักเพื่อผลิตแอลกอฮอล์ได้สูงสุด

2.6.4 กระบวนอื่น ๆ

เป็นการใช้จุลชีพในการย่อยสลายลิกนินและเฮมิเซลลูโลส เช่น brown - fungi, และ soft - rot fungi โดย (Dashtban et al., 2009) พบว่ารา เช่น Trichodermo reesei และ Aspergillus niger สามารถผลิตเอนไซม์ Extracellular cellulolytic เป็นจำนวนมาก ในขณะที่แบคทีเรียและราแบบไร้อากาศ 2 - 3 ชนิด สามารถผลิตเอนไซม์ Cellulolytic ซึ่งเอนไซม์เหล่านี้สามารถย่อยสลายวัตถุดิบพวกลิกโนเซลลูโลสได้เป็นอย่างดี ข้อดีของกระบวนการนี้คือใช้พลังงานน้อย ไม่ใช้สารเคมีในกระบวนการทำให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม อัตราการย่อยสลายที่เกิดขึ้นค่อนข้างต่ำทำให้ต้องใช้เวลานานในการย่อยสลายและใช้พื้นที่ในการผลิตมาก

นอกจากนี้ยังมีวิธีการย่อยสลายขั้นต้นที่ใช้หลายวิธีมาร่วมกัน ซึ่งวิธีการเหล่านี้ล้วนแล้วเป็นเทคนิคที่น่าสนใจอย่างยิ่ง โดยสรุปผลการย่อยสลายต้นด้วยวิธีต่างๆ ต่อโครงสร้างชีวมวลดังแสดงในรูปที่ 2.5 อย่างไรก็ตามการย่อยสลายขั้นต้นนั้นมีข้อจำกัดโดยปัจจัยต่าง ๆ เช่น ผลึกของเซลลูโลส พื้นที่ผิวและปริมาณลิกนิน การลดสารยับยั้งจากการย่อยสลายขั้นต้นพบว่าเป็นค่าใช้จ่ายที่สูงหรืออาจไม่มีผล ปริมาณน้ำ การใช้พลังงานและปริมาณสารเคมี และวิธีการที่สามารถดำเนินงานได้อย่างต่อเนื่อง สิ่งเหล่านี้ยังต้องมีการศึกษาในอนาคตต่อไป

	Increase accessible surface area	Decrystallization cellulose	Solubilization hemicellulose	Solubilization lignin	Formation furfural/ HMF	Alteration lignin structure
Mechanical	+	+				
ST/SE	+		+	–	+	+
LHW (batch)	+	ND	+	–	–	–
LHW (flow through)	+	ND	+	+/–	–	–
Acid	+		+	–	+	+
Alkaline	+		–	+/–	–	+
Oxidative	+	ND		+/–	–	+
Thermal + acid	+	ND	+	+/–	+	+
Thermal + alkaline (lime)	+	ND	–	+/–	–	+
Thermal + oxidative	+	ND	–	+/–	–	+
Thermal + alkaline + oxidative	+	ND	–	+/–	-	+
Ammonia (AFEX)	+	+	–	+	–	+
CO_2 explosion	+		+			

+ = major effect.
– = minor effect.
ND = not determined.

รูปที่ 2.5 ผลจากการย่อยสลายขั้นต้นต่อโครงสร้างวัสดุชีวมวล

ที่มา : Hendrik sand Zeeman, (2008)

2.7 ศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทน (Biochemical Methane Potential, BMP)

การศึกษา BMP คือขั้นตอนการศึกษาความสามารถในการย่อยสลายแบบไร้อากาศของวัสดุที่สนใจ การทดลองจะเปรียบเทียบการผลิตแก๊สชีวภาพของวัสดุที่สัดส่วนผสมต่าง ๆ กัน โดยคำนวณในรูปของปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมดต่อปริมาณของวัสดุที่ถูกย่อยสลายไป การศึกษา BMP ทำได้โดยนำของเสียมาผสมกับตะกอนจุลินทรีย์แบบไร้อากาศในขวด ไล่แก๊สออกซิเจนออกให้หมดแล้วจึงปิดขวดให้สนิท จากนั้นทำการวัดปริมาณและวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ เก็บข้อมูลจนกว่าระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) คือไม่มีแก๊สเกิดเพิ่มขึ้น แล้วจึงนำค่าปริมาณแก๊สมีเทนสะสมที่ได้ไปพล็อตกราฟเพื่อคำนวณหาค่า BMP ข้อมูลที่ได้จากการศึกษา BMP นั้น ถูกนำไปใช้ในการประเมินศักยภาพในการย่อยสลายแบบไร้อากาศของวัสดุนั้น ๆ และเปรียบเทียบการนำไปใช้งานในระบบขนาดใหญ่ เพื่อใช้ในการออกแบบระบบบำบัดแบบไร้อากาศต่อไป

$$\text{BMP} = \frac{\text{ปริมาตรของแก๊สมีเทนสะสม (มิลลิลิตร)}}{\text{น้ำหนักวัสดุ (Volatile Solids) ที่ป้อนเข้าไป (กรัม)}}$$

2.8 คลื่นเสียงอัลตราโซนิค (Ultrasonic)

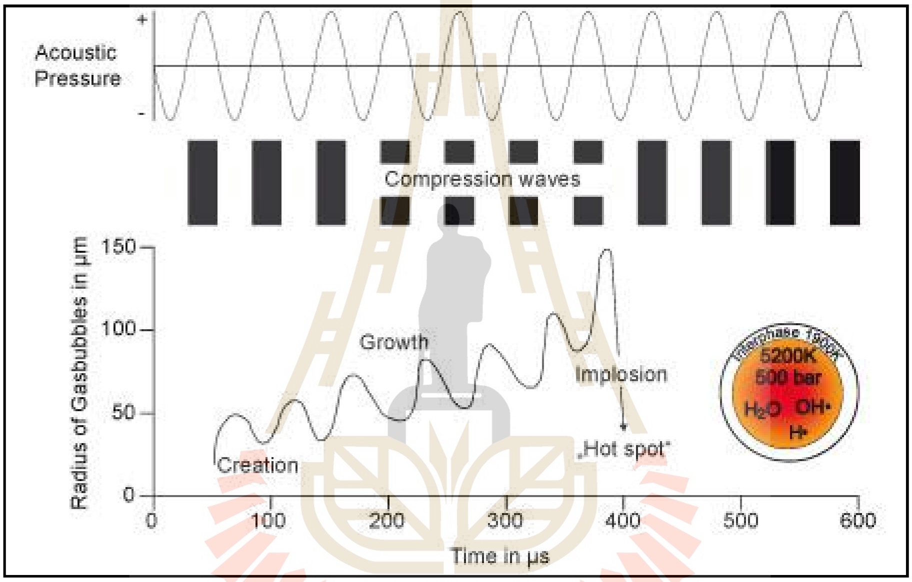
เป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินกว่าที่หูมนุษย์จะได้ยิน โดยทั่วไปแล้วหูของมนุษย์โดยเฉลี่ยจะได้ยินเสียงสูงถึงเพียงแค่ประมาณ 15 kHz เท่านั้น โดยปกติอัลตราโซนิคมักจะหมายถึงคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 KHz ขึ้นไป สาเหตุที่มีการนำเอาคลื่นย่านอัลตราโซนิคมาใช้ก็เพราะว่าเป็นคลื่น

ที่มีทิศทางทำให้เราสามารถเล็งคลื่นเสียงไปยังเป้าหมายที่ต้องการได้โดยเจาะจง ซึ่งเป็นคุณสมบัติของคลื่นอย่างหนึ่ง โดยอุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานในรูปอื่นให้มาเป็นพลังงานทางกลโดยการสั่นไปมา ซึ่งทำให้เกิดคลื่นเสียงย่านอัลตราโซนิกกระจายไปได้หรือแปลงพลังงานทางกลให้มาเป็นพลังงานในรูปอื่นได้นั้น มีชื่อเรียกว่า อัลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ (Ultrasonic Transducer) โดยคลื่นที่มีความถี่สูงขึ้นความยาวคลื่นก็จะยิ่งสั้นลง ถ้าความยาวคลื่นยาวกว่าช่องเปิดของตัวกำเนิดเสียงความถี่นั้น (เช่น คลื่นความถี่ 300 Hz ในอากาศจะมีความยาวถึงประมาณ 1 เมตร) ซึ่งจะยาวกว่าช่องที่ให้คลื่นเสียงออกมาจากตัวกำเนิดเสียงโดยทั่วไปมาก ซึ่งจะทำให้คลื่นเกิดการหักเบนที่ขอบด้านนอกของตัวกำเนิดเสียงทำให้เกิดการกระจายทิศทางคลื่นแต่ถ้าความถี่สูงขึ้นมาอยู่ในย่านอัลตราโซนิค เช่น 40 kHz จะมีความยาวคลื่นในอากาศเพียงประมาณ 8 มม. เท่านั้นซึ่งเล็กกว่ารูเปิดของตัวที่ให้กำเนิดเสียงความถี่นี้มากคลื่นเสียงจะไม่มีการเลี้ยวเบนที่ขอบ จึงพุ่งออกมาเป็นลำแคบ ๆ มีทิศทางแน่นอน ซึ่งการมีทิศทางของคลื่นเสียงย่านอัลตราโซนิคทำให้เรานำไปใช้งานได้หลายอย่าง เช่น นำไปใช้ในเครื่องควบคุมระยะไกล (Ultrasonic remote control) เครื่องวัดความหนาของวัตถุโดยสังเกตระยะเวลาที่คลื่นสะท้อนกลับมา เครื่องวัดความลึกและทำแผนที่ใต้ท้องทะเล ใช้ในเครื่องหาตำแหน่งอวัยวะบางส่วนในร่างกาย ใช้ทดสอบการรั่วไหลของท่อ เครื่องล้างอุปกรณ์ (Ultrasonic cleaner) โดยให้เกิดการยุบตัวของฟองอากาศขนาดเล็ก ๆ ที่มีพลังงานสูง เป็นต้น

2.8.1 คาวิเตชัน (Cavitation) (Mason, 1991)

การใช้ประโยชน์จากคลื่นอัลตราโซนิคโดยผ่านตัวกลางที่เป็นของเหลวนั้น พลังงานจากคลื่นเสียง (20 - 100 kHz) ที่ใส่ลงไปไม่ได้ส่งผลกระทบโดยตรงต่อโมเลกุลของสารที่ละลายอยู่ในของเหลวนั้น ๆ แต่เกิดจากการยุบตัว (collapse) ของฟองอากาศขนาดเล็ก ๆ (micro bubbles) ในของเหลว ซึ่งเกิดจากสภาวะแรงดันที่เป็นลบ (negative pressure) ที่ถูกส่งผ่านมาทางคลื่นเสียง การเกิดคาวิเตชันมาจากการที่เสียงอัลตราโซนิคที่ส่งออกมาในรูปแบบของคลื่นที่มีการอัดและขยายผ่านตัวกลางของเหลวเกิดสภาวะแรงดันที่เป็นลบภายในตัวกลาง ซึ่งถ้ามีแรงดันที่เป็นลบที่เกิดจากการส่งผ่านคลื่นเสียงนี้มากเพียงพอที่ทำให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลของตัวกลางมากกว่าระยะวิกฤติ จะส่งผลให้เกิดการยุบตัว ของโมเลกุลตัวกลาง เกิดเป็นฟองอากาศขนาดเล็ก ๆ ซึ่งเราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดคาวิเตชัน (Cavitation) แสดงในรูปที่ 2.6 ความรุนแรงจากการยุบตัวนี้ จะทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานรอบ ๆ ฟองอากาศขนาดเล็ก ซึ่งพบว่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นมีค่าประมาณ 5,000 เคลวิน และมีแรงดันที่สูงถึง 1,000 atm (Suslick, 1989)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

5) อุณหภูมิ (temperature) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิภายนอกให้กับตัวกลางของเหลวจะทำให้แรงดันไอของของเหลวนั้น ๆ มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ทำให้มีโอกาสในการเกิดคาวิเตชันสูงขึ้น แต่จะทำให้ความรุนแรงในการระเบิดลดต่ำลง ซึ่งพบว่าเมื่อให้ความร้อนกับสารละลายจนถึงจุดเดือดจะทำให้ผลของการเกิดคาวิเตชันลดลงอย่างเห็นได้ชัด

6) ฟองอากาศ (bubbled gas) ปริมาณแก๊สที่ละลายอยู่ในของเหลวตัวกลางที่มีค่าอยู่ในระดับหนึ่งจะเป็นตัวช่วยทำให้เกิดคาวิเตชันได้ง่ายขึ้น เนื่องจากแก๊สเหล่านั้นจะเป็นเสมือน nuclei ทำให้เกิดเป็นฟองอากาศขนาดเล็กได้ง่าย แต่ถ้ามีปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการแพร่เข้าไปในฟองอากาศซึ่งจะทำให้ลดความรุนแรงของการเกิดคาวิเตชัน

7) ความดัน (External pressure) เมื่อทำการเพิ่มความดันภายนอกให้กับระบบจะส่งผลให้การเกิดคาวิเตชันมีค่าสูงขึ้น และส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาทางเคมีของเสียงด้วย ซึ่งจากการทดลองของ (Cum et al., 1988) ได้ข้อสรุปว่าที่ความถี่ใด ๆ เมื่อเพิ่มความดันจนถึงค่าที่เหมาะสมจะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีของเสียงสูงที่สุด

8) ความเข้ม (intensity) ความเข้มของพลังงานที่ส่งผ่านเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อ แอมปลิจูด (amplitude) ของสัญญาณคลื่นเสียง ซึ่งเมื่อเพิ่มความเข้มของสัญญาณให้สูงขึ้นจะทำให้เกิดผลของปฏิกิริยาทางเคมีของเสียงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่การเพิ่มความเข้มของสัญญาณที่สูงขึ้นจะส่งผลถึง 1) การผุกร่อนของตัวกระจายสัญญาณ 2) ความเข้มที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดการ decoupling ระหว่างผิวของตัวส่งสัญญาณและตัวกลางของเหลวทำให้ประสิทธิภาพของการเกิดคาวิเตชันลดลง 3) เมื่อเพิ่มความเข้มจะทำให้มีโอกาสเกิดคาวิเตชันสูงขึ้นมีฟองขนาดเล็กมากขึ้น จนทำให้เมื่อมีฟองอากาศมากเกินไปเกิดการรวมตัวกันเป็นฟองอากาศที่ใหญ่ขึ้นและไปลดทอนความเข้มของสัญญาณ (Benes et al., 2008)

9) การลดความแรงของพลังงาน (attenuation of sound) เมื่อคลื่นเสียงผ่านตัวกลางที่เป็นของเหลวจะเกิดการสูญเสียความเข้มของสัญญาณหรือพลังงานลดลงอยู่ในรูปของความร้อน ดังนั้นหากต้องการให้พลังงานส่งออกไปอย่างทั่วถึงในตัวกลางจึงจำเป็นต้องเพิ่มความเข้มของสัญญาณให้เหมาะสม ยกตัวอย่างเช่น พลังงานคลื่นเสียงความถี่ 118 kHz ที่ส่งผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำจะมีค่าลดลงถึงร้อยละ 50 ที่ระยะทาง 1 กิโลเมตร

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กัลยา อยู่นาน, (2546) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำตาลจากเปลือกและกากมันสำปะหลังโดยที่กรดซัลฟิวริกนั้นมีประสิทธิภาพการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์สูงกว่ากรดไฮโดรคลอริกและกรดอะซิติก ที่ความเข้มข้นกรด 0.1 M กรดซัลฟิวริกมีอัตราการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ถึงร้อยละ 60

โดยที่กรดไฮโดรคลอริก และอะซิติก มีอัตราการเกิดน้ำตาลรีดิวซ์ร้อยละ 45 และ 15 การใช้อุณหภูมิและระยะเวลามีผลต่ออัตราการเกิดน้ำตาลรีดิวซ์ โดยอุณหภูมิสูงและระยะเวลานานขึ้นมีส่วนทำให้การผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ดีขึ้น โดยพบว่าค่าที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากกากมันสำปะหลังคือร้อยละ 1.5 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก 0.025 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 60 นาที ซึ่งให้ปริมาณน้ำตาลกลูโคสร้อยละ 41.34 ไซโรสร้อยละ 9.5 แรมโนส ร้อยละ 2.11 และ 5 ไฮดรอกซี่เมททิลเฟอร์ฟิวรัล ร้อยละ 0.16 โดยน้ำหนักแห้ง

ไกรวุฒิ พ่วงเดช, (2550) ศึกษาการย่อยกากมันสำปะหลังโดยการย่อยสลายขั้นต้นด้วยเอนไซม์เซลลูเลส งานวิจัยแบ่งออกเป็นสองช่วงการทดลอง เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของเอนไซม์เซลลูเลสในการย่อยกากมันสำปะหลังร้อยละ 0.1 (น้ำหนักต่อปริมาตร) เทียบเท่าอัตราภาระอินทรีย์ 0.07 กรัมซีโอดี/ลิตร/วัน ที่อุณหภูมิห้องและ 50 องศาเซลเซียส พบว่าการย่อยสลายสูงสุดที่ซีโอดีละลายน้ำ 187 และ 189 มิลลิกรัมต่อกรัมแห้ง เวลาทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง พีเอช 5 ที่อุณหภูมิห้องและ 50 องศาเซลเซียส ปริมาณเอนไซม์เซลลูเลส 400 และ 200 ยูนิตต่อกรัมแห้งตามลำดับ จากนั้นนำสภาวะที่ 2 เพื่อศึกษาผลของเอนไซม์เซลลูเลสในถังปฏิกรณ์ซีเควนซิ่งแบต์ไร้อากาศแบบ 2 ขั้นตอน ประกอบด้วยถังปฏิกรณ์หมักกรดและถังปฏิกรณ์สร้างมีเทน โดยเดินระบบต่อเนื่องควบคุมอุณหภูมิ 50 องศา ที่เวลาเก็บกัก เท่ากับ 2 และ 18 วันตามลำดับ ทำการทดลองที่อัตราภาระอินทรีย์ 0.075, 0.1, 0.5, 1 และ2 ซีโอดี/ลิตร/วัน ถูกป้อนเข้าสู่ถังปฏิกิริยาหมักกรดมี่มีการเติมเอนไซม์ ควบคุมระบบที่พีเอช 5 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบว่า ที่อัตราภาระ 0.1 กรัมซีโอดี/ลิตร/วัน ที่มีการเติมเอนไซม์เซลลูเลส ทำให้ประสิทธิภาพไฮโดรไลซิสสูงสุดร้อยละ 37.6 และประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนสูงสุดร้อยละ 53 และมิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมซีโอดี

สิริวรรณ แก้วชิงดวง, (2554) ศึกษาสภาวะการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์และกรดที่เหมาะสม เพื่อผลิตเป็นเอทานอล พบว่าการย่อยด้วยกรดซัลฟิวริกให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงกว่าการย่อยด้วยกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid) โดยทำการย่อยที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จะให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุด และการย่อยด้วยเอนไซม์โดยใช้เอนไซม์เซลลูเลสย่อยที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสย่อยที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเอนไซม์กลูโคอะไมเลสย่อยที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดเท่ากับ 899.11 มิลลิกรัมต่อกรัมกากมันสำปะหลัง และเมื่อนำน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้ไปหมัก พบว่าน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์จะให้ปริมาณเอทานอลที่สูงกว่าน้ำตาลรีดิวซ์จากการย่อยด้วยกรด

สวลี ดีประเสริฐ และคณะ (2555) ศึกษาการใช้ประโยชน์จากกากมันสำปะหลังเพื่อผลิตเป็นน้ำตาล โดยนำกากมันสำปะหลังที่ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลิตร มาแปรรูปเป็นน้ำตาลด้วยการดำเนินงานแบบต่อเนื่องเป็น 2 ขั้นตอน คือขั้นตอนแรกคือการใช้เอนไซม์ย่อยเซลลูโลส (CTec 2) 1 มิลลิลิตร ในการย่อยเวลา 6 ชั่วโมง ให้น้ำตาลรีดิวซ์ และน้ำตาลทั้งหมด 8.21, 15.77 กรัมต่อลิตร และขั้นตอนที่สองเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส ใช้เวลาในการย่อย 2 ชั่วโมง ให้น้ำตาลรีดิวซ์ และน้ำตาลทั้งหมด 18.24, 73.56 กรัมต่อลิตร และหลังจากนั้นใช้เอนไซม์กลูโคอะไมเลส ใช้เวลาในการเปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาล 12 ชั่วโมง ให้น้ำตาลรีดิวซ์ และน้ำตาลทั้งหมดสูงสุดที่ 65.80, 73.56 กรัมต่อลิตร

มาศยา โชคสงวน, (2550) ศึกษาผลของการย่อยสลายขั้นต้นด้วยกรดต่อการสร้างซีโอดีละลายและการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง การย่อยสลายขั้นต้นแบ่งเป็น 3 สภาวะ คือ 1) กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0 - 2.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) ระยะเวลา 30 วัน 2) กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0 - 0.5 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 55 - 121 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 15 - 60 วัน และ 3) กรดอะซิติก กรดโพรไพออนิก กรดไนตริก หรือกรดไฮโดรคลอริกที่อุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส และเพิ่มระยะเวลา 30 นาที ผลการทดลองพบว่าการย่อยสลายขั้นต้นที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ร่วมกับการใช้กรดซัลฟิวริกไม่สามารถเพิ่มซีโอดีละลายต่อซีโอดีทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่การใช้น้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง และการใช้อุณหภูมิ 70, 90 และ 121 องศาเซลเซียส ร่วมกับกรดซัลฟิวริกสามารถเพิ่มซีโอดีละลายต่อซีโอดีทั้งหมดได้สูงสุด 19.2, 42.5, 81.0 และ 83.4 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบชนิดของกรดที่ใช้พบว่า กรดแก่สามารถเพิ่มซีโอดีละลายต่อซีโอดีทั้งหมดมากกว่ากรดอ่อน 7 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาต่อศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน (บีเอ็มพี) พบว่า การย่อยสลายขั้นต้นที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาทีและไม่ใช้กรดมีค่าบีเอ็มพีสูงกว่าบีเอ็มพีกากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้น 14 เปอร์เซ็นต์

นริสรา สิทธิวงศ์ และคณะ (2552) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังตาม Anunputtikul, (2004) ที่มีความชื้น 72.53% และส่วนประกอบหลักคือ Organic carbon, Total nitrogen, Crude fiber, Protein และ Total solid เท่ากับ 38.14, 0.72, 3.86, 0.65 และ 27.47% ตามลำดับ ใช้กากมันสำปะหลังที่ความเข้มข้นในรูป Total solid เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0% และยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจน (Anunputtikul, 2004) อัตราส่วน C:N ที่ 10:1, 20:1 และ 30:1 ปริมาตรหมัก 3.75 ลิตรในถังหมักขนาด 5 ลิตร หมักที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 44 วัน ตรวจวัดผลผลิตก๊าซโดยต่อหมักเข้ากับถังที่บรรจุ 4 N NaOH ก่อนเข้าถังเก็บสะสมก๊าซ พบการผลิตที่ให้ก๊าซชีวภาพ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สูงสุด 153.5 ลิตร เมื่อใช้กากมันสำปะหลังเข้มข้น 2% (Total solids) และอัตราส่วน C : N เท่ากับ 20 : 1 กระบวนการหมักสิ้นสุดที่ 44 วันของการหมักมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ 3.49 ลิตรต่อวัน

Panichnumsin et al., (2012) เพิ่มผลผลิตมีเทนในการผลิตที่ใช้กากมันสำปะหลังร่วมกับมูลสุกรเป็น feedstock โดยใช้ระบบหมัก Two - phase anaerobic system ใน Two - phase continuously stirred tank reactor โดยช่วง Hydrolysis/Acidification อยู่ในถังปฏิกรณ์ที่มี Active volume 0.5 ลิตร Hydraulic retention time (HRT) 2 วัน และ Methanogenic phase ในถังปฏิกรณ์ขนาดบรรจุ 5 ลิตร ที่มี Active volume 3 ลิตรและ HRT 13 วัน พบว่ากิจกรรมของแบคทีเรียกลุ่ม Hydrolytic/Acidogenic ลดลงเมื่อใช้อัตราส่วนของกากมันสำปะหลังมากกว่า 50% เนื่องจากมีการยังยั้งด้วย pH ประมาณ 4 และได้ผลผลิตมีเทนสูงสุดที่ 370 มิลลิลิตรต่อกรัม Volatile solids (added) เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างกากมันสำปะหลังและมูลสุกรเท่ากับ 60 : 40 พบว่า Co - digestion ในถังหมัก Two - phase continuously stirred tank reactor ลดลง Solids ลงได้ 14% และให้ผลผลิตมีเทนเพิ่มขึ้น 36% เมื่อเทียบกับการผลิตในถังหมัก Single - phase continuously stirred tank reactor

Sriroth et al., (2000) ศึกษาการนำกากมันสำปะหลังมาการย่อยสลายขั้นต้นต้นด้วยโซนิเคชั่นหรืออินคิวเบเตอร์ร่วมกับการใช้เอนไซม์ผสมระหว่างเอนไซม์เซลลูเลสและเพกทินเนส โดยใช้เอนไซม์เซลลูเลส 15 NCU และ เอนไซม์เพกทินเนส 122.5 PG ต่อกรัมกากแห้ง เป็นเวลา 60 นาที พบว่าทำให้ใช้แป้งได้อีกร้อยละ 40

Zhang et al., (2011) ได้ศึกษาหาค่าที่เหมาะสมในการย่อยสลายขั้นต้นด้วยกรดซัลฟิวริกต่อผลผลิตก๊าซมีเทนจากกากมันสำปะหลัง ซึ่งจากการทดลองใช้การย่อยสลายขั้นต้นใช้อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว 1:10 (น้ำหนักต่อปริมาตร) กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 1.32 - 4.68 (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) ระยะเวลา 3.18 - 36.82นาที อุณหภูมิ 143.8 - 176.82 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อวิเคราะห์ด้วยอาเอ็มเอสแล้วพบว่าค่าที่เหมาะสมคือ 157.84 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกร้อยละ 2.99 (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) ระยะเวลา 20.15 นาที ซึ่งจะได้ค่ามีเทนมากกว่าชุดควบคุมร้อยละ 56.96

Zhang et al., (2013) ศึกษาการผลิตมีเทนจากกากมันสำปะหลังและ Cassava distillage จากการผลิตเอทาอนลในระบบหมัก Single - stage process และ Two - stage process ด้วย Seed culture ที่เตรียมจาก Anaerobic sludge หมักเพื่อย่อยกากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านและผ่านขั้นตอนการเตรียมโดยการย่อยด้วยแบคทีเรียเซลลูโลสในถังหมัก Anaerobic sequencing batch reactor พบว่ากระบวนการผลิตมีเทนในขั้น Methanogenic step มีความเสถียรเมื่อค่า Organic loading rate ต่ำกว่า 20 กรัม COD ต่อลิตรต่อวัน ระบบหมัก Two - step process ที่ได้มีเทน 0.125 ลิตรต่อกรัม COD ถึง 17.6%

Xiao and Clarkson, (1997) ศึกษาการนำกระดาษหนังสือพิมพ์มาทำการย่อยสลายขั้นต้นด้วยกรดผสมระหว่างอะซิตริกและไนตริก พบว่ามีความเข้มข้นของกรดอะซิตริกร้อยละ 35 และ ไนตริกร้อยละ 2 สามารถกำจัดลิกนินได้ร้อยละ 80 และเมื่อนำเข้าระบบปฏิกรณ์ไร้อากาศพบว่าสามารถสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้มากกว่ากระดาษหนังสือพิมพ์ที่ไม่ได้ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นด้วยกรด และกระดาษหนังสือพิมพ์ที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ร้อยละ 75 ในการทดลองที่ 60 วัน

Zhao et al., (2010) ศึกษาผลการย่อยสลายขั้นต้นฟางข้าวด้วยกรดผสมระหว่างอะซิติกและโพรไพออนิก พบว่าความเข้มข้นของกรด 0.75 โมลต่อลิตร และเวลาที่ทำการย่อยสลายขั้นต้น 2 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนของแข็งและของเหลวเท่ากับ 1 : 20 คือค่าที่เหมาะสมในการย่อยสลายขั้นต้น หลังจากนั้นจึงเข้าระบบแอนแอโรบิคแบบแบตช์ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส 30 วัน พบว่าฟางข้าวที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นด้วยกรดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพร้อยละ 35.84

Castrillon et al., (2011) ได้ศึกษา การผลิตแก๊สชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสัตว์และกลีเซอรีนโดยใช้การย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค จากนั้นได้ศึกษาที่สภาวะอุณหภูมิมีโซฟิลิกและเทอร์โมฟิลิกในถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ จากการศึกษาพบว่าการหมักร่วมระหว่างมูลสัตว์และกลีเซอรีน 4 % (w/w) สภาวะอุณหภูมิมีโซฟิลิกสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้เพิ่มขึ้น 400 % และจากการประยุกต์ใช้การย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค (20 kHz, 0.1 kW, เวลา 4 นาที) พบว่าสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้เพิ่มขึ้น 800 % เปรียบเทียบกับชุดควบคุมไม่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้น จากการศึกษาที่สภาวะอุณหภูมิเทอร์โมฟิลิกและการหมักร่วมระหว่างมูลสัตว์และกลีเซอรีน 6 % (w/w) สามารถผลิตแก๊สมีเทนได้ 348 (L methane / kg COD removed)

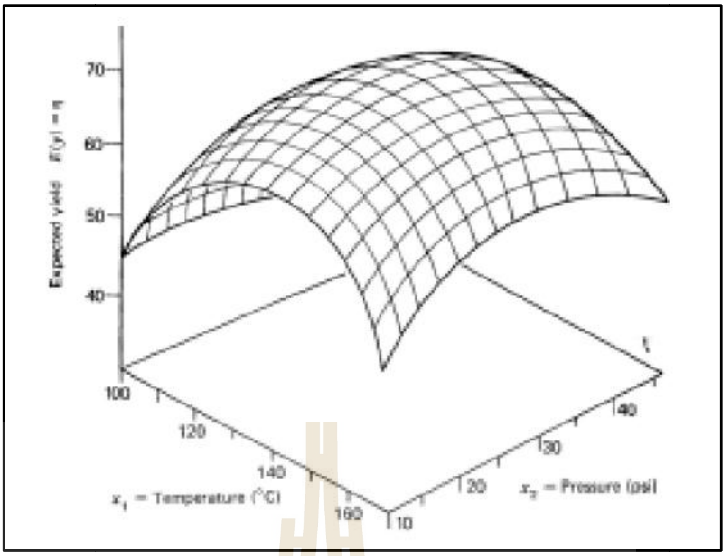
Shuzhen et al., (2016) ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างต้นข้าวโพดและมูลวัวนม โดยใช้การย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค ที่มี Power intensities เท่ากับ 0, 189.39, 284.09, และ 378.79 kJ ที่เวลา 0, 20, 30, และ 40 นาที ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างพื้นผิวด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) โดยวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตแก๊สชีวภาพ ผลการศึกษาพบว่าโครงสร้างของมูลวัวนมมีลักษณะของการกระจายและโครงสร้างพื้นผิวของต้นข้าวโพดมีลักษณะขรุขระเพิ่มมากขึ้น หลังจากผ่านการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค (ความถี่ 50 kHz และกำลัง 250 W) การผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดจากการหมักร่วมมีค่าเท่ากับ 240.32 mL/gVS $_{added}$ ที่เวลา 30 นาที และสัดส่วนข้าวโพดต่อมูลวัวนมเท่ากับ (30 : 0) เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม มีค่า 141.65 mL/gVS $_{added}$ ผลจากการวิเคราะห์ปัจจัยชี้ให้เห็นว่าย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคผลต่อการผลิตแก๊สชีวภาพ โดยมีผลต่อขั้นตอนการผลิต

แก๊สชีวภาพในขั้นต้นและมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมในระหว่างกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพให้มีความเหมาะสม

2.10 การออกแบบการทดลอง (Design of experiment, DOE)

DOE เป็นเครื่องมือคุณภาพตัวหนึ่งซึ่งจะมีทำการทดลองตามรูปแบบที่ได้ถูกออกแบบไว้เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ แล้วสร้างเป็นสมการทางสถิติซึ่งเป็นความสัมพันธ์แบบประมาณการระหว่างค่าตัวแปรอิสระ (ซึ่งมักเป็น Quality Characteristics) กับตัวแปรตาม (ซึ่งมักเป็น Process Product Variables) เพื่อให้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology, RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบสนอง ซึ่งนำเสนอในรูปแบบกราฟสามมิติเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ 2 ตัว ซึ่งอยู่ในแนวระนาบ หรือแกน X และ แกน Y กับตัวแปรตาม ซึ่งอยู่ในแนวตั้ง แกน Z โดยระดับการวัดของตัวแปรต้องอยู่ในระดับ Interval หรือ Ratio scale และความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระสองตัวกับตัวแปรตาม 1 ตัวสามารถอธิบายได้โดยการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ ที่เรียกว่าตัวแบบ (Model)

RSM ส่วนมากจะใช้แบบจำลองกำลังหนึ่งหรือแบบจำลองกำลังสองในการหาผล โดยหลักการทำ RSM ต้องทำการกำหนดตัวแปรอิสระอย่างน้อย 2 ตัวขึ้นไป และกำหนดตัวแปรตามอย่างน้อย 1 ตัว จากนั้นนำข้อมูลของตัวแปรอิสระ (x) มาสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อาจเป็นความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรง ความสัมพันธ์เชิงเส้น Interaction หรือความสัมพันธ์เชิง Quadratic แล้วนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปสร้างเป็นภาพสามมิติดังรูปที่ 2.7 จากนั้น ทำตรวจสอบจุดหรือช่วงที่เหมาะสม (Optimization) และทำการพิสูจน์สมการตัวแบบที่สร้างได้ โดยการใช้จุดที่อยู่ในบริเวณช่วงที่เหมาะสมของตัวแปรอิสระเพื่อนำไปทำการทดลองอีกครั้ง แล้ววัดค่าตัวแปรตามเพื่อตรวจสอบกับตัวแปรตามที่หาได้จากสมการ ว่ามีความใกล้เคียงกันหรือไม่อย่างไร (เปรียบเทียบค่าสังเกตที่ได้จากการทำการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการตัวแบบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองถ้าแบบจำลองไม่เหมาะสม ให้เริ่มต้นทดลองเพื่อได้ข้อมูลมาสร้างสมการตัวแบบใหม่)

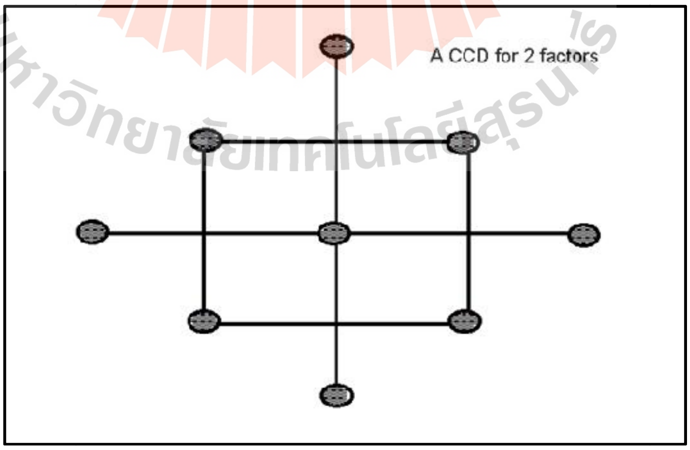


รูปที่ 2.7 ภาพ 3 วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology, RSM)

ที่มา : Montgomery, 1991

การออกแบบการทดลองมี 2 วิธีที่ได้รับความนิยมคือ

1) การออกแบบ Central Composite Design (CCD) เป็นวิธีการหาพื้นผิวผลตอบที่นิยมใช้เพื่อหากระบวนการที่เหมาะสม โดยทั่วไป CCD ประกอบด้วย 2 ปัจจัย ซึ่งมีตำแหน่งการทดลองทั้งหมด 5 ตำแหน่งคือ (+α, 0) (-α, 0) (0, 0) (0, +α) และ (0, -α) ดังรูปที่ 2.8

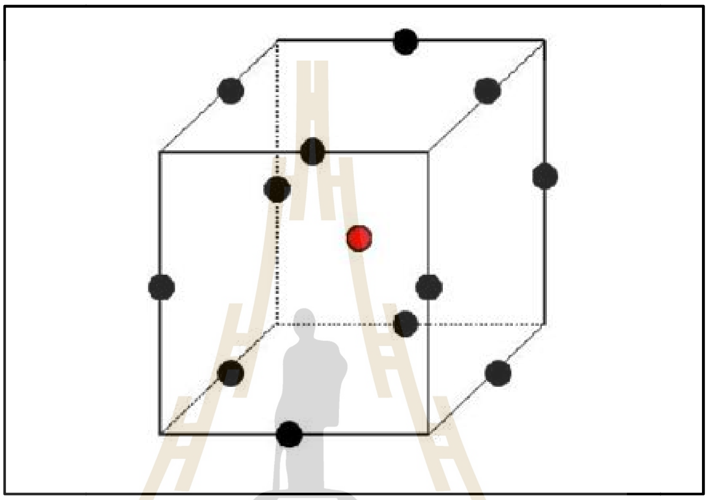


รูปที่ 2.8 การออกแบบ Central Composite Design แบบ 2 ปัจจัย

ที่มา : http://www.prismtc.co.uk/tipsheets/optimization-designs-2-building-the-design.html

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2) การออกแบบบ็อกซ์ - เบห์นเคน (Box - Behnken Design) เป็นการออกแบบ 3 ระดับสำหรับพื้นผิวผลตอบ เป็นการออกแบบแบบรูปทรงกลมที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลม และไม่ได้เอารวมเอาจุดใด ๆ ที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรเอาไว้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การออกแบบ Box - Behnken Design

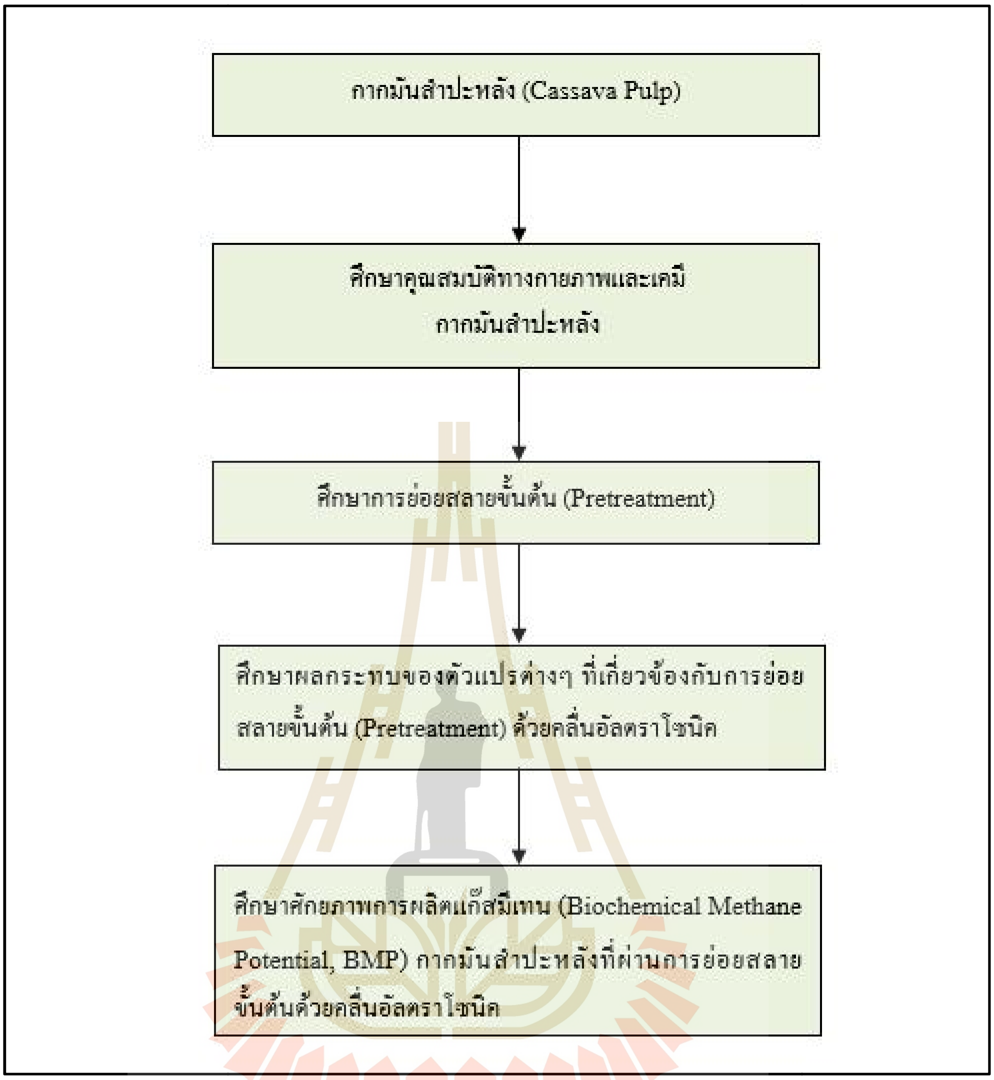
ที่มา : http://www.prismtc.co.uk/tipsheets/optimization-designs-2-building-the-design.html

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
เครื่องมือและวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาผลการย่อยสลายขั้นต้นกากมันสำปะหลังด้วยคลื่นอัลตราโซนิค (Ultrasonic) ต่อศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทน โดยมีขั้นตอนการวิจัยโดยสรุปดังนี้ 1) การเตรียมตัวอย่างกากมันสำปะหลัง 2) ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกากมันสำปะหลัง 3) ศึกษาการย่อยสลายขั้นต้น (Pretreatment) ด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 4) ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายขั้นต้นกากมันสำปะหลังด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 5) ศึกษาศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธี (Biochemical Methane Potential, BMP) ของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค มีรายละเอียดในการดำเนินงานวิจัยดังแสดงใน รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

3.2.1 การเตรียมกากมันสำปะหลัง

ในงานวิจัยนี้จำเป็นต้องมีการเตรียมกากมันสำปะหลังเพื่อให้เหมาะสมกับขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย โดยการนำกากมันสำปะหลังจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังมาตากแดดจนแห้ง และนำมาอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อป้องกันโครงสร้างเซลล์พืชถูกทำลาย (Gunaseelan, 2004) นำมาบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 250 mesh เพื่อควบคุมขนาดอนุภาคและมีการตรวจสอบคุณภาพและคุณสมบัติก่อนการใช้งานทุกครั้ง ดังแสดงรูปที่ 3.2 กากมันสำปะหลังที่ใช้ในการทดลอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

หาปริมาณความชื้นของหัวมันและกากมันสำปะหลังตามวิธีมาตรฐาน Association of Official Analytical Chemists (AOAC) International (2000) โดยอบภาชนะ สำหรับหาความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบใส่ไว้ในตู้ดูดความชื้นที่อุณหภูมิห้อง อบและชั่งจนได้น้ำหนักคงที่ ชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน 5 กรัม ใส่ลงในภาชนะหาความชื้นที่ทราบน้ำหนัก อบตัวอย่างในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบใส่ไว้ในตู้ดูดความชื้นเมื่อเย็นแล้วชั่งน้ำหนัก อบซ้ำอีกครั้ง ครั้งละประมาณ 30 นาที ชั่งน้ำหนักจนได้น้ำหนักที่คงที่ คำนวณปริมาณความชื้น

3.2.3.2 ปริมาณแป้ง (Starch)

วิเคราะห์ปริมาณแป้งทั้งหมดในหัวมันสำปะหลังและกากมันด้วยวิธี Colorimetric (Phenol-sulphuric acid) ตาม Dubois et al., (1956) ดังนี้ บรรจุสารละลายตัวอย่าง (ที่เตรียมให้มีความเข้มข้น 1% และเจือจาง 100 - 500 เท่า ด้วยน้ำกลั่น) ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง (ตัวอย่างที่วิเคราะห์ควรเจือจางให้มีปริมาณน้ำตาลเข้มข้นอยู่ในช่วง 10 - 70 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) เติม Phenol (80% โดยน้ำหนัก) ปริมาตร 0.05 มิลลิลิตร หรือ Phenol (5% โดยน้ำหนัก) ปริมาตร 1.0 มิลลิลิตร ในหลอดตัวอย่าง เติม Sulphuric acid เข้มข้น 95.5% โดยน้ำหนัก ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที จากนั้นเขย่าสารละลายให้เข้ากัน นำหลอดทดลองที่บรรจุสารผสมสำหรับวิเคราะห์น้ำตาลไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วย Spectophotometer ที่ความยาวคลื่นแสง 485 นาโนเมตร และหาปริมาณน้ำตาลทั้งหมดในตัวอย่างวิเคราะห์โดยคำนวณจากสมการกราฟมาตรฐาน

3.2.3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน

การศึกษาองค์ประกอบของปริมาณองค์ประกอบ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยใช้วิธี Detergent analysis (Goering and Van Soest, 1970)

3.2.3.4 Total solid (TS)

ตรวจวัดปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำหมักก๊าซชีวภาพตามวิธีมาตรฐาน AOAC International (2000) และวิธีดัดแปลงของ Zhang and Zhang (1999) โดยการอบภาชนะในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบใส่ในตู้ดูดความชื้นจนกระทั่งอุณหภูมิภาชนะถึงที่อุณหภูมิห้องชั่งให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน ชั่งตัวอย่างน้ำหมักปริมาตร 50 มิลลิลิตร ให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนที่บรรจุในภาชนะหาความชื้นที่ทราบน้ำหนัก อบตัวอย่างในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบใส่ในตู้ดูดความชื้นเมื่อเย็นแล้วชังน้ำหนัก อบซ้ำอีกครั้ง ๆ ละประมาณ 30 นาที ชั่งน้ำหนักจนได้น้ำหนักคงที่ คำนวณหาปริมาณของแข็งทั้งหมด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.2.3.5 Volatile solid (VS)

วัดปริมาณของแข็งที่ระเหยได้โดยวิธีการวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน AOAC (1990)

3.2.3.6 การวิเคราะห์ ซีโอดี (COD)

เพื่อศึกษาความต้องการออกซิเจนทางเคมี ประกอบด้วย TCOD (TCOD) และ Soluble COD (SCOD) โดยวิธีการวิเคราะห์ตามวิธี APHA - AWWA - WPCF method (1995) AOAC (1990)

3.2.3.7 การวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพของกากมันสำปะหลัง

การศึกษาโครงสร้างทางกายภาพของกากมันสำปะหลังเพื่อวิเคราะห์รูปสัณฐาน โดยใช้กล้องกำลังขยายสูง (Scanning Electron microscope) หรือเรียกแบบย่อว่า SEM (JEOL - JSM - 601OLV - USA)

3.3 การศึกษาผลการย่อยสลายขั้นต้นกากมันสำปะหลังด้วยคลื่นอัลตราโซนิค และผลกระทบของคลื่นอัลตราโซนิค ต่อศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธี (Biochemical methane potential, BMP)

การย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค โดยใช้เครื่องกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิคและอัลตราโซนิคทรานดิวเซอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และมีพิกัดข้อกำหนดแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 ขั้นตอนการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค มีดังนี้

1) นำกากมันสำปะหลังที่ได้ผ่านขั้นตอนการเตรียมมาแล้ว มาปรับสัดส่วนของแข็งต่อของเหลวให้ได้ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 - 4 (น้ำหนักต่อปริมาตร)

2) ทดสอบการย่อยสลายขั้นต้นด้วยเครื่องอัลตราโซนิคที่คลื่นความถี่ในเขตให้พลังงาน(Power region, 20 - 100 kHz) (Timothy, 2003) โดยใช้ค่า 45 kHz จากนั้นเริ่มเดินเครื่องอัลตราโซนิคโดยใช้เวลา 10 - 30 นาที ทำการปรับความเข้มโดยกำหนดที่ 160 Watt (0.42 W/cm)

3) ทำการเก็บตัวอย่างความเข้มข้นก่อนและหลังการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค โดยใช้ค่า TCOD และค่า SCOD ไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก) Ultrasonic transducer
Model : HNC-8SH-3840

ข) Ultrasonic generator
Model : AG1007

ค) ชุดทดสอบระดับห้องปฏิบัติการ

รูปที่ 3.4 เครื่องกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิคและอัลตราโซนิคทรานดิวเซอร์

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดเครื่องอัลตราโซนิค

Technical data	Specification
Ultrasonic Generater	Model : AG 1007
Power	Max 300 W
Operating Frequency	20kHz - 1MHz
Dimentions	135 mm x 254 x mm x 385 mm
Weigh	12 kg
Power supply	200 - 240 Vac, 50 - 60 Hz, 4.5 A
Ultrasonic Transducer	Model : HNC-8SH-3840
Frequency	45 KHz
Static capacitance	3800 ± 10 %
Resonance impedance	20 ohm
Size (dia * hight)	48*51
Power	60W

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.3.1 การออกแบบการทดลอง

ในการศึกษาความสามารถการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคในการผลิตแก๊สมีเทนของกากมันสำปะหลัง (Cassava Pulp) ใช้แนวคิดการออกแบบการทดลอง ด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology , RSM) โดยวางแผนการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) ช่วยออกแบบการทดลอง แปรระดับของตัวแปรอิสระ 5 ระดับ โดยศึกษา 2 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนคือ สัดส่วนกากมันสำปะหลังต่อน้ำความเข้มข้นร้อยละ 0.5 - 4 (น้ำหนักต่อปริมาตร) และเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายขั้นต้นระหว่าง 10 - 30 นาที เป็นตัวแปรต้น โดยมีจำนวนชุดการทดลองทั้งสิ้น 11 ชุดการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ชุดการทดลอง (BMP) ที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม RSM

ชุดการทดลอง	ปัจจัย	
	Total solid (ร้อยละ, w/v)	Time (min)
1	กากมันสำปะหลัง TS 0.5	Pretreatment 20 min
2	กากมันสำปะหลัง TS 1.0	Pretreatment 13 min
3	กากมันสำปะหลัง TS 1.0	Pretreatment 27 min
4	กากมันสำปะหลัง TS 2.25	Pretreatment 10 min
5	กากมันสำปะหลัง TS 2.25 (1)	Pretreatment 20 min
6	กากมันสำปะหลัง TS 2.25 (2)	Pretreatment 20 min
7	กากมันสำปะหลัง TS 2.25 (3)	Pretreatment 20 min
8	กากมันสำปะหลัง TS 2.25	Pretreatment 30 min
9	กากมันสำปะหลัง TS 3.5	Pretreatment 13 min
10	กากมันสำปะหลัง TS 3.5	Pretreatment 27 min
11	กากมันสำปะหลัง TS 4.0	Pretreatment 20 min

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.3.2 การเตรียมหัวเชื้อและการเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์

ใช้หัวเชื้อจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศจากฟาร์มสุกรในจังหวัดนครราชสีมา และเตรียมสารอาหารที่จำเป็นสำหรับการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ เพื่อปรับสมดุลการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ (Raposo et al., 2006) ดังแสดงในตารางที่ 3.3 และตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.3 การเตรียมสารอาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ Stock nutrient (ความเข้มข้น 5 เท่า)

สารอาหาร	ปริมาณสาร(mg/L)
NH_4Cl	1.4
K_2HPO_4	1.25
$MgSO_4 \cdot H_2O$	0.5
$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	0.05
Yeast extract	0.5
Trace element solution	5 mL/L

ตารางที่ 3.4 การเตรียมสารอาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ Trace element solution

สารอาหาร	ปริมาณสาร(mg/L)
$FeCl_2 \cdot 4H_2O$	2000
H_3BO_3	50
$ZnCl_2$	50
$CuCl_2 \cdot 2H_2O$	38
$MnCl_2 \cdot 4H_2O$	500
$(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$	50
$AlCl_3 \cdot 6H_2O$	90
$CoCl_2 \cdot 6H_2O$	2,000 mg/L

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.3.3 ขั้นตอนการทดลอง

โดยได้มีการกำหนดความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ (Inoculum) ที่ใช้ให้มีความเข้มข้นในรูปของแข็งระเหยง่าย (VS) เท่ากับ 15 g/L โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) ใช้ขวดแก้วปริมาตร 120 mL สำหรับใช้เป็นขวดหมัก มีปริมาตรใช้งาน 60 mL

2) เติมกากมันสำปะหลัง (Cassava pulp) ให้มีสัดส่วนของความเข้มข้นของกากมันสำปะหลังที่ปริมาณ Total solid (TS) ดังตารางที่ 3.2 และเตรียมเพิ่มอีกหนึ่งขวดโดยไม่เติมกากมันสำปะหลัง เพื่อใช้เป็นชุดควบคุม

3) เติมหัวเชื้อจุลินทรีย์ให้ได้ค่า Volatile Solid (VS) ในแต่ละขวดเท่ากับ 15g/L ของปริมาตรใช้งาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

°C ตามลำดับ ใช้ He เป็น carrier gas ที่อัตราการไหล 50 mL/min ซึ่งจะทำการวัดปริมาณแก๊สชีวภาพ และสัดส่วนของแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้น และทำการวิเคราะห์ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทน ($mLCH_4/gVS_{added}$), Rm : maximum specific methane production rate (mL/d) ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์การตรวจวัดในขั้นตอนการวัดศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธี BMP

ขั้นตอนการทดลอง	การตรวจวัด	ตัวชี้วัด
วิเคราะห์ศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธีทางชีวเคมี(BMP) จากกากมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค	Vol.CH_4, % CH_4 content	- Methaneyield ($mLCH_4/gVS_{added}$) - Rm (mL/d)

3.3.5 การหาอัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (maximum specific methane production rate, Rm)

การทดลองนี้ใช้สมการที่ (3.1) (Gompertz equation) (Ho et al., 2010) มาช่วยทำนายอัตราการผลิตก๊าซมีเทน ซึ่งปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (H (t)) และอัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (Rm) ในสมการที่ 3.1 สามารถคำนวณโดยใช้ฟังก์ชั่น Solve ในโปรแกรม Microsoft excel

$$H(t) = H \cdot \exp\left\{-\exp\left[\frac{Rm \cdot e}{H}(\lambda - t) + 1\right]\right\} \tag{3.1}$$

เมื่อ H (t) = ก๊าซมีเทนสะสม (Cumulative methane production, mL CH_4)

H = ศักยภาพในการผลิตมีเทน (Methane production potential, mL CH_4)

λ = เวลาที่จุลินทรีย์ใช้ในการปรับตัวก่อนเพิ่มจำนวน (Time of Lag phase, d)

Rm = อัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (Maximum specific methane production rate, mL/d)

T = เวลา (Time, d)

e = ค่าคงที่ทางคณิตศาสตร์ มีค่าประมาณ 2.71828

เมื่อทำการทดลองตามที่ออกแบบแล้วนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์โดยหาค่าผลการตอบสนอง คือ Methane yield โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ 3.2

$$\text{Methane yield} = b0 + b1*TS, (w/v) + b2*Time, (min) + b3*TS, (w/v)*TS, (w/v) + b4*Time, (min)*Time, (min) + b5*TS, (w/v)*Time, (min) \quad (3.2)$$

โดย b คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยตามลำดับของตัวแปร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4
ผลการศึกษาและอภิปรายผล

4.1 คุณสมบัติของกากมันสำปะหลังที่ใช้ในการทดลอง

4.1.1 ศึกษาคุณสมบัติของกากมันสำปะหลัง

จากการศึกษาพบว่ากากมันสำปะหลังเป็นวัสดุเหลือทิ้งประเภทของแข็งที่มีปริมาณมากที่สุดจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง โดยกากมันสำปะหลังที่ได้จากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังจะมีลักษณะเป็นเนื้อละเอียด สีขาวหรือสีเหลืองอ่อน ๆ จับตัวกันเป็นก้อน ๆ เนื่องจากมีความชื้นสูงประมาณ 71.62 - 81.60 % มีปริมาณแป้งอยู่ปริมาณร้อยละ 50 - 60 ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งกากมันที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีคุณสมบัติดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกากมันสำปะหลัง

พารามิเตอร์	ค่าที่วิเคราะห์ได้		
	งานวิจัยนี้	Rattanachomsri et al ., (2009)	Paepatung et al., (2009)
Moisture (%)	71.62	ND	81.60
Starch (%) (% dry weight)	60.50	60.1	50
TS (g/kg dry weight)	96.30	ND	ND
VS (g/kg dry weight)	90.70	ND	98.07
Cellulose (% dry weight)	1.48	15.6	12.21
Hemi-cellulose (% dry weight)	1.72	4.58	ND
Lignin (% dry weight)	3.15	2.83	1.86

ND : not determined

4.1.2 คุณสมบัติของหัวเชื้อจุลินทรีย์ (Seed)

หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้นำมาจากระบบบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรในจังหวัดนครราชสีมา โดยมีคุณสมบัติดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตารางคุณสมบัติของหัวเชื้อจุลินทรีย์ (Seed)

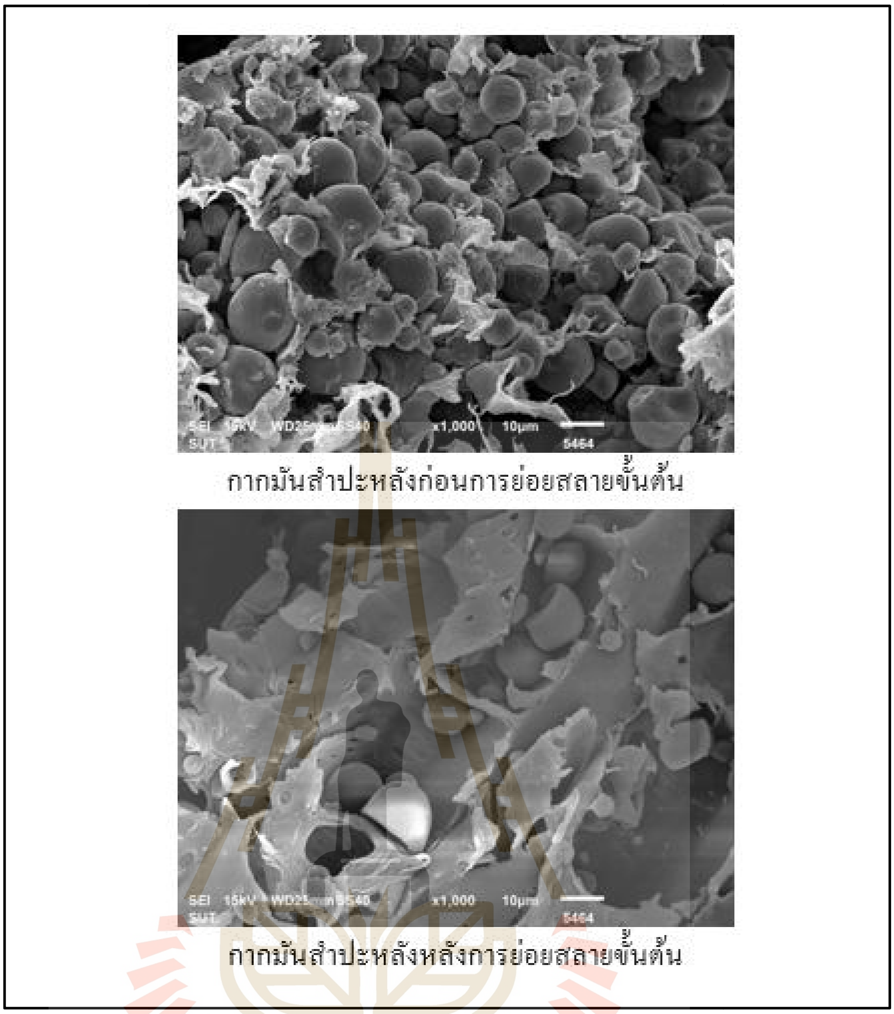
พารามิเตอร์	ค่าที่วิเคราะห์ได้
PH	6.9
TS (g/l)	78.79
VS (g/l)	50.94

4.2 การศึกษาผลการย่อยสลายขั้นต้นกากมันสำปะหลังด้วยคลื่นอัลตราโซนิค และผลกระทบของคลื่นอัลตราโซนิคต่อศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธี (Biochemical methane potential, BMP)

4.2.1 ผลกระทบของการย่อยสลายขั้นต้นกากมันสำปะหลังด้วยคลื่นอัลตราโซนิคต่อโครงสร้างทางกายภาพ

การย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคทำให้ผนังเซลล์โดยทั่วไปถูกย่อยสลายออก อาทิ ในรูปของเฮมิเซลลูโลส โครงสร้างทางกายภาพในรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคทำให้วัสดุลิกโนเซลลูโลสมีปริมาตรพอร์สูงขึ้นหรือมีสภาพเป็นโพรงเพิ่มขึ้นส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการย่อยสลายออกมาของเฮมิเซลลูโลสที่จับอยู่กับเซลลูโลส (Grethlein, 1985) และบางส่วนที่หลุดออกมาเป็นอนุภาคเล็ก ๆ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.1 กากมันสำปะหลังก่อนและหลังการย่อยสลายขั้นต้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.2.2 ผลกระทบของการย่อยสลายขั้นต้นกากมันสำปะหลังด้วยคลื่นอัลตราโซนิค

วัตถุประสงค์ของการย่อยสลายขั้นต้นคือ แยกส่วนที่ย่อยสลายได้ยาก โดยวัดประสิทธิภาพจากปริมาณซีโอดีที่ละลายในน้ำ (SCOD) มีปัจจัยที่ใช้ในการทดลองคือ ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง (น้ำหนักต่อปริมาตร) และเวลาที่ใช้ในการอัลตราโซนิค ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณซีโอดีละลายน้ำในการย่อยสลายขั้นต้น โดยได้ศึกษาการย่อยสลายขั้นต้นกากมันสำปะหลังความเข้มข้นร้อยละ 0.5 - 4 (น้ำหนักต่อปริมาตร) และเวลา (นาที) ที่ใช้ในการย่อยสลายขั้นต้นระหว่าง 10 - 30 นาที จากนั้นจึงหาความแตกต่างระหว่างการย่อยสลายเริ่มต้นและหลังจากเวลาสิ้นสุดการย่อยสลาย ดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยวัดปริมาณซีโอดีละลายน้ำก่อนการย่อยสลาย

ขั้นต้นและซีโอดีละลายน้ำหลังการย่อยสลายขั้นต้น แล้วเปรียบเทียบซีโอดีละลายน้ำเพิ่มขึ้น คิดออกมาเป็นสัดส่วนต่อซีโอดีทั้งหมดในรูปร้อยละ ดังสมการที่ 4.1

$$COD_{solubilisation}(\%) = \frac{SCOD}{TCOD} X100 \quad (4.1)$$

$COD_{solubilisation}$ (%) = ซีโอดีละลายน้ำต่อซีโอดีทั้งหมด

SCOD = ซีโอดีละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

TCOD = ซีโอดีทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)

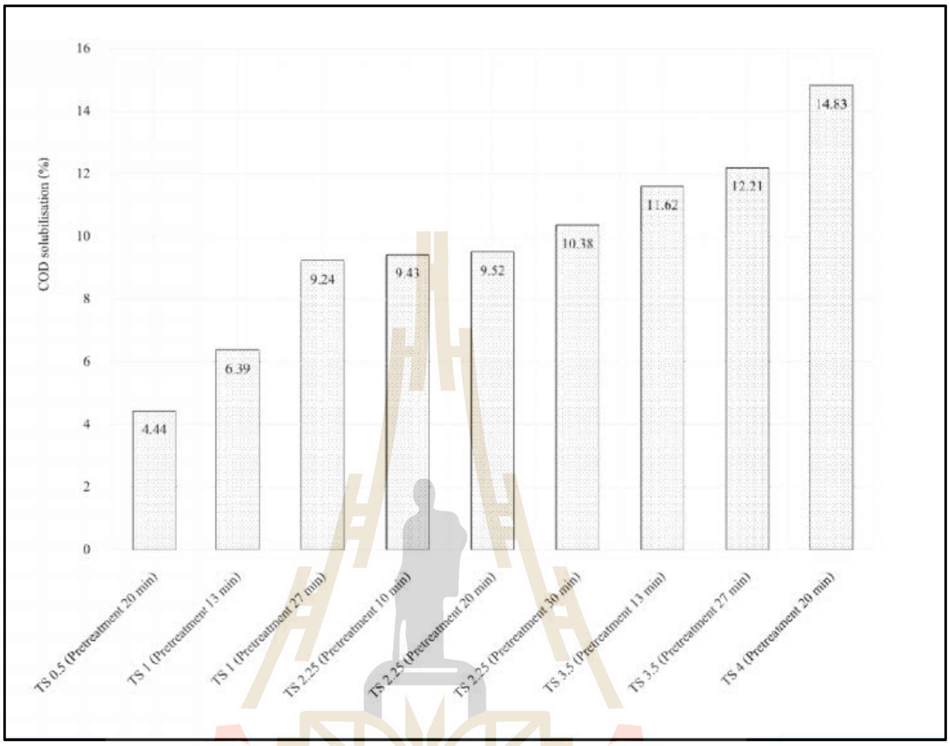
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของซีโอดีละลายน้ำ (SCOD) ของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค

				SCOD (mg/l)			COD solubilisation (%)		
Freq. kHz	TS (%)	Time (min)	TCOD (mg/l)	Initial	final	ΔSCOD	initial	final	ΔCOD solubilisation
45	0.5	20	4,230	128	316	188	3.03	7.47	4.44
	1	13	6,460	185	598	413	2.86	9.26	6.39
	1	27	6,460	185	782	597	2.86	12.11	9.24
	2.25	10	7,854	198	939	741	2.52	11.96	9.43
	2.25	20	7,854	245	993	748	3.12	12.64	9.52
	2.25	30	7,854	279	1,094	815	3.55	13.93	10.38
	3.5	13	8,132	283	1,228	945	3.48	15.10	11.62
	3.5	27	8,132	299	1,292	993	3.68	15.89	12.21
	4	20	9,234	355	1,724	1,369	3.84	18.67	14.83

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากการทดสอบการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณซีโอดีที่ละลายในน้ำ (SCOD) โดยศึกษาการย่อยสลายขั้นต้นกากมันสำปะหลังที่มีความเข้มข้นปริมาณ Total solid (TS) ร้อยละ 0.5 - 4 (น้ำหนักต่อปริมาตร) และเวลา (นาที) ที่ใช้ในการย่อยสลายขั้นต้นระหว่าง 10 - 30 นาทีพบว่า $COD_{solubilisation}$ (%) มีปริมาณซีโอดีที่ละลายในน้ำ (SCOD) เพิ่มขึ้นร้อยละ 4.44 - 14.8 จากข้อมูลผลการทดสอบพบว่าปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นมีผลต่อ

ปริมาณซีโอดีที่ละลายในน้ำโดยเมื่อเพิ่มเวลาในการย่อยสลายขั้นต้นมากขึ้นมีผลทำให้ปริมาณซีโอดีที่ละลายน้ำเพิ่มขึ้นไปด้วยดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น (TS) ร้อยละ 0.5 - 4 (w/v) และค่า COD $_{solubilisation}$ (%)

4.3 ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธี (Biochemical methane potential, BMP) ที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นกากมันสำปะหลังด้วยคลื่นอัลตราโซนิค

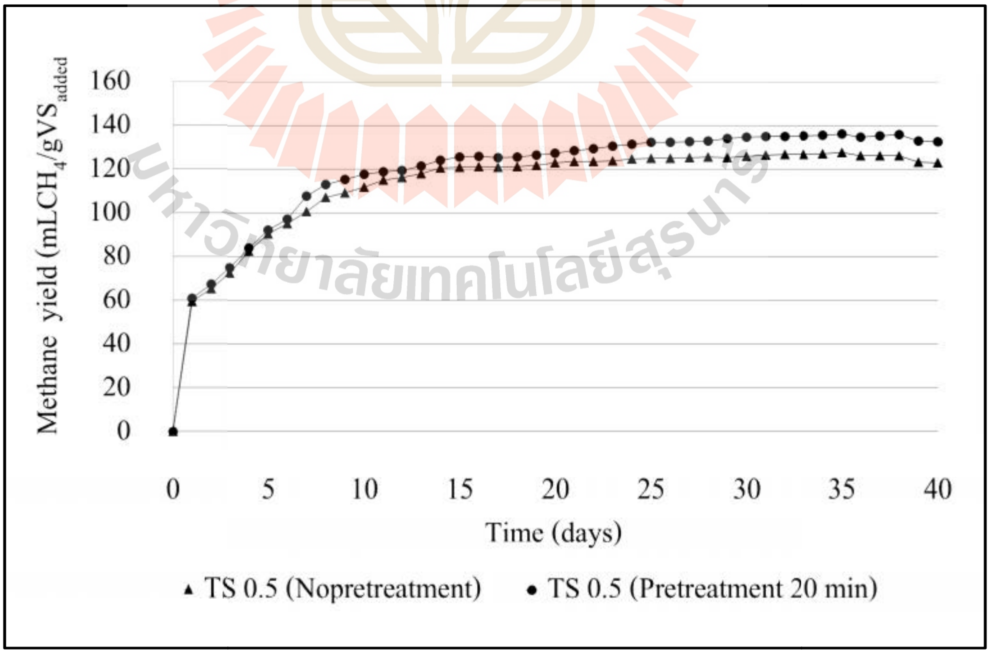
4.3.1 ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธี (Biochemical methane potential, BMP) ที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง (TS) ร้อยละ 0.5 (น้ำหนักต่อปริมาตร) และเวลา 20 นาที

จากการทดสอบการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคพบว่าเกิดการสลายตัวของของสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของสารละลายเพิ่มขึ้นเมื่อพิจารณาที่โครงสร้างทางกายภาพจะพบว่าลักษณะของเส้นใยที่ห่อหุ้มเม็ดแป้งจะเกิดมีความพรุนและความโปร่งทำให้ง่ายต่อการย่อยสลายทางชีวภาพได้ดียิ่งขึ้น การอธิบายอัตราการผลิตแก๊สมีเทนจากการทดลองเพื่อหาศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธีทางชีวเคมีนั้น สามารถอธิบายได้ด้วยเส้นโค้งการเกิดแก๊สสะสม โดยสมการ Modified Gompertz ดังแสดงในหัวข้อ 3.3.5 โดยผลการศึกษาพบว่าปริมาณ Methane yield ที่

เกิดขึ้นพบว่าที่เข้มข้นกากมันสำปะหลัง (TS) ร้อยละ 0.5 (น้ำหนักต่อปริมาตร) และเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายขั้นต้น 20 นาทีคือ132.86±13.54 $mLCH_4/gVS_{added}$ และ นอกจากนั้น Methane yield มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นซึ่งมีค่า Methane yield คือ 123.03 ±13.71$mLCH_4/gVS_{added}$ และอัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (*Rm*) มีค่า 4.15 $mLCH_4$ /d นอกจากนี้จากผลการทดลองจะพบว่าเวลาที่จุลินทรีย์ใช้ในการปรับตัวก่อนเพิ่มจำนวน (λ) จะใช้ระยะเวลาน้อย ดังรูปที่ 4.3 ตัวชี้วัดที่ใช้ในการวัดปริมาณ Methane yield ที่เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละคือ Increase of methane yield (IMY) (Zhang Q. et al., 2011) โดยวิเคราะห์จากปริมาณ Methane yield $_{pretreatment}$ เทียบกับปริมาณ Methane yield $_{control}$ ดังสมการที่ 4.2

$$\text{IMY}(\%) = \frac{(\text{Methane yield})_{\text{pretreatment}} - (\text{Methane yield})_{\text{control}}}{(\text{Methane yield})_{\text{control}}} \times 100 \qquad (4.2)$$

โดยค่า(Methane yield)$_{pretreatment}$ คือ ศักยภาพปริมาณมีเทนที่ผ่านย่อยสลายขั้นต้น ($mLCH_4/gVS_{added}$) และ (Methane yield)$_{control}$ คือศักยภาพปริมาณมีเทนที่ไม่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้น($mLCH_4/gVS_{added}$) จากตารางที่ 4.4 พบว่ามีค่า IMY เพิ่มขึ้นร้อยละ 7.99 เมื่อเทียบกับกากมันสำปะหลังที่ไม่ได้ผ่านการย่อยสลายขั้นต้น



รูปที่ 4.3 ปริมาณ Methane yield ที่ความเข้มข้น Total solid ร้อยละ 0.5 (w/v) และเวลา 20 นาที

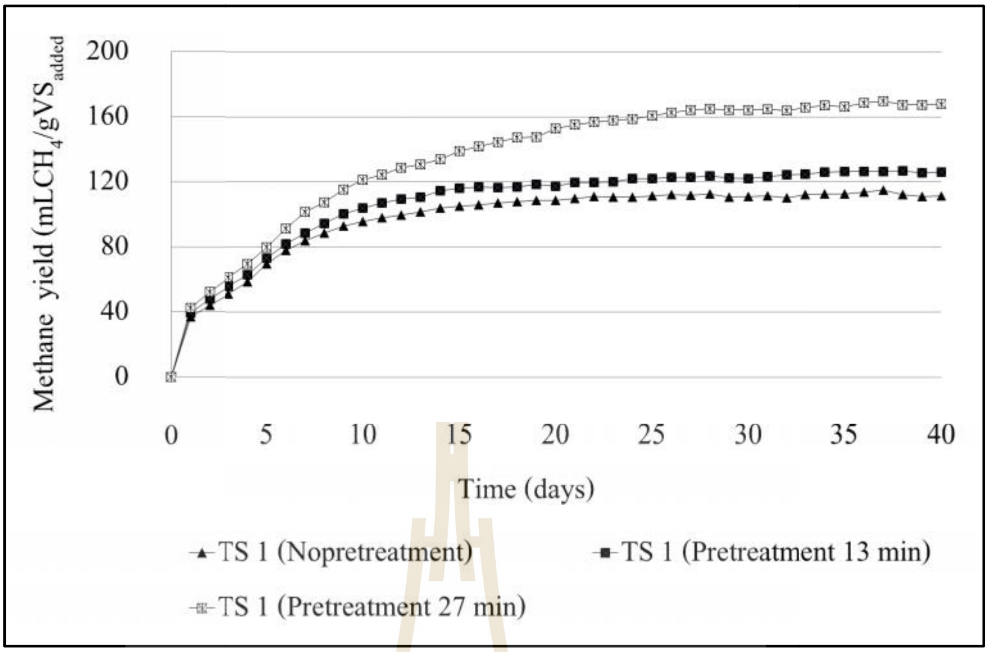
ตารางที่ 4.4 ปริมาณ Methane yield, อัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด และเวลาที่จุลินทรีย์ใช้ในการปรับตัวก่อนเพิ่มจำนวนจากการศึกษา BMP ของกากมันสำปะหลังความเข้มข้น (TS) ร้อยละ 0.5 (w/v) เวลา 20 นาที

TS (ร้อยละ, w/v)	Methane yield ($mLCH_4/gVS_{added}$)	H ($mLCH_4$)	*Rm* ($mLCH_4/d$)	λ (d)
TS 0.5 (No pretreatment)	123.03 ± 13.71	37.57	4.15	- 1.89
TS 0.5 (Pretreatment 20 min)	132.86 ± 13.54	39.48	4.34	- 2.14

หมายเหตุ : ทุก ๆ ชุดการทดลองถูกหักจากชุดควบคุม (แก๊สที่เกิดขึ้นจาก seed) และปริมาณมีเทนปรับค่าที่สภาวะ(STP)

4.3.2 ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธี (Biochemical methane potential, BMP) ที่ความเข้มข้น (TS) ร้อยละ 1.0 (น้ำหนักต่อปริมาตร) และเวลาในการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 13 นาที และ 27 นาที

จากการทดสอบพบว่าปริมาณ Methane yield ที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง (TS) ร้อยละ 1 (น้ำหนักต่อปริมาตร) และเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายขั้นต้น 13 นาที คือ 125.79±5.91 $mLCH_4/gVS_{added}$ อัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (*R*m) มีค่า 6.39 $mLCH_4$ /d และ 27 นาทีคือ 167.59±1.58 $mLCH_4/gVS_{added}$ อัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (*R*m) มีค่า 6.50 $mLCH_4$ /d โดยพบว่าปริมาณ Methane yield มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นคือ111.35 ±6.48 $mLCH_4/gVS_{added}$ อัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (*R*m) มีค่า 6.04 $mLCH_4$ /d ดังรูปที่ 4.4 และเมื่อพิจารณาเวลาที่เพิ่มขึ้นจาก 13 นาทีเป็น 27 นาที พบว่ามีปริมาณ Methane yield ที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน นอกจากนี้จากผลการทดลองจะพบว่าเวลาที่จุลินทรีย์ใช้ในการปรับตัวก่อนเพิ่มจำนวน (λ) จะใช้ระยะเวลาน้อย ผลการเปรียบเทียบค่า IMY ดังตารางที่ 4.5 ที่เวลา 13 นาทีมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ12.9 และร้อยละ 50.5 เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 27 นาที



รูปที่ 4.4 ปริมาณ Methane yield ที่ความเข้มข้น Total solid ร้อยละ 1 (w/v) เวลา 13, 27 นาที

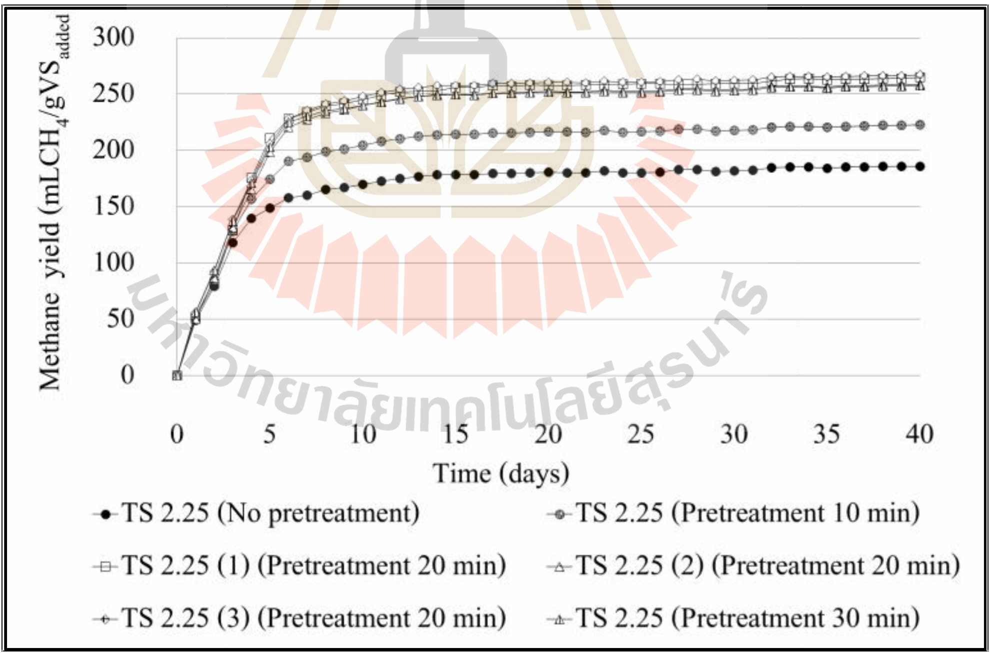
ตารางที่ 4.5 ปริมาณ Methane yield, อัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด และเวลาที่จุลินทรีย์ใช้ในการปรับตัวก่อนเพิ่มจำนวน จากการศึกษา BMP ของกากมันสำปะหลังความเข้มข้น (TS) ร้อยละ 1 (w/v) เวลา 13 และ 20 นาที

TS (ร้อยละ, w/v)	Methane yield ($mLCH_4/gVS_{added}$)	H ($mLCH_4$)	*Rm* ($mLCH_4/d$)	λ (d)
TS 1 (No pretreatment)	111.35 ± 6.48	66.63	6.04	- 1.60
TS 1 (Pretreatment 13 min)	125.79 ± 5.91	73.84	6.39	- 1.86
TS 1 (Pretreatment 27 min)	167.59 ± 1.58	99.41	6.50	- 2.68

หมายเหตุ : ทุก ๆ ชุดการทดลองถูกหักจากชุดควบคุม (แก๊สที่เกิดขึ้นจาก seed) และปริมาณมีเทนปรับค่าที่สภาวะ (STP)

4.3.3 ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธี (Biochemical methane potential, BMP) ที่ความเข้มข้น (TS) ร้อยละ 2.25 (น้ำหนักต่อปริมาตร) และเวลาในการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 10, 20 และ 30 นาที

จากผลการทดสอบพบว่าปริมาณ Methane yield ที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง (TS) ร้อยละ 2.25 (w/v) และเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายขั้นต้น 10 นาที คือ 222.58±32.37 $mLCH_4/gVS_{added}$ อัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (*Rm*) มีค่า 43.35 $mLCH_4$ /d ที่เวลา 20 นาที คือ 264.81±4.90, 258.77±10.93, 267.07±1.51 $mLCH_4/gVS_{added}$ อัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (Rm) มีค่า 43.35, 54.62, 47.22 ,57.07 $mLCH_4$ /d และปริมาณ Methane yield ที่ 30 นาที คือ 257.52±3.78 $mLCH_4/gVS_{added}$ อัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (*Rm*) มีค่า 54.84 $mLCH_4$ /d พบว่าปริมาณ Methane yield มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นคือ186.04 ±4.35 $mLCH_4/gVS_{added}$ อัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (*Rm*) มีค่า 41.16 $mLCH_4$ /d นอกจากนี้จากผลการทดลองจะพบว่าเวลาที่จุลินทรีย์ใช้ในการปรับตัวก่อนเพิ่มจำนวน (λ) จะใช้ระยะเวลาน้อย ดังรูปที่ 4.5 เมื่อพิจารณาเวลาที่เพิ่มขึ้น10 นาทีเป็น 20 นาทีและ30 นาที พบว่ามีปริมาณ Methane yield ที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันโดยเมื่อเปรียบเทียบค่า IMY ดังตารางที่ 4.6 ที่เวลา 10 นาทีมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ19.64 เพิ่มเวลาเป็น 20 นาทีมีค่า IMY ร้อยละ 42.34, 39.09, 43.55 และสุดท้ายเมื่อเพิ่มเวลาเป็น 30 นาทีเพิ่มขึ้นร้อยละ 38.42



รูปที่ 4.5 ปริมาณ Methane yield ที่ความเข้มข้น Total solid ร้อยละ 2.25 (w/v) เวลา 10, 20 และ 30 นาที

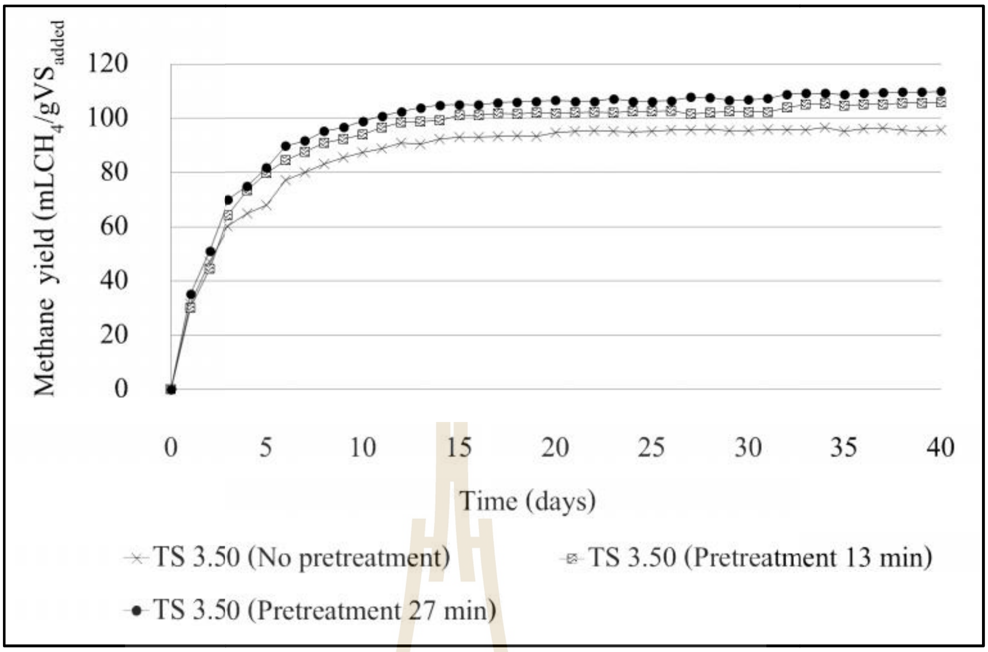
ตารางที่ 4.6 ปริมาณ Methane yield, อัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด และเวลาที่จุลินทรีย์ใช้ในการปรับตัวก่อนเพิ่มจำนวน จากการศึกษา BMP ของกากมันสำปะหลังความเข้มข้น (TS) ร้อยละ 2.25 (w/v) เวลา 10, 20 และ 27 นาที

TS (ร้อยละ, w/v)	Methane yield ($mLCH_4/gVS_{added}$)	H ($mLCH_4$)	*Rm* ($mLCH_4/d$)	λ (d)
TS 2.25 (No pretreatment)	186.04±4.35	214.17	41.16	- 0.26
TS 2.25 (Pretreatment 10 min)	222.58±32.37	257.86	43.35	- 0.15
TS 2.25 (1) (Pretreatment 20 min)	264.81±4.90	307.75	54.62	0.21
TS 2.25 (2) (Pretreatment 20 min)	258.77±10.93	270.14	47.22	- 0.14
TS 2.25 (3) (Pretreatment 20 min)	267.07±1.51	310.89	57.07	-
TS 2.25 (Pretreatment 30 min)	257.52±3.78	300.26	54.84	- 2.68

หมายเหตุ : ทุก ๆ ชุดการทดลองถูกหักจากชุดควบคุม (แก๊สที่เกิดขึ้นจาก seed) และปริมาณมีเทนปรับค่าที่สภาวะ(STP)

4.3.4 ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธี (Biochemical methane potential, BMP) ที่ความเข้มข้น (TS) ร้อยละ 3.35 (น้ำหนักต่อปริมาตร) และเวลาในการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 13 นาที และ 30 นาที

จากผลการทดสอบพบว่าปริมาณ Methane yield ที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง (TS) ร้อยละ 3.5 (w/v) และเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายขั้นต้น 13 นาทีคือ105.34±3.34 $mLCH_4/gVS_{added}$ อัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (*Rm*) มีค่า 28.10 $mLCH_4$ /d และ 27 นาทีคือ 109.87±2.06 $mLCH_4/gVS_{added}$ อัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (*Rm*) มีค่า 29.94 $mLCH_4$ /d พบว่าปริมาณ Methane yield มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นคือ 95.48 ±1.95 $mLCH_4/gVS_{added}$ อัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (*Rm*) มีค่า 23.53 $mLCH_4$ /d นอกจากนี้จากผลการทดลองจะพบว่าเวลาที่จุลินทรีย์ใช้ในการปรับตัวก่อนเพิ่มจำนวน (λ) จะใช้ระยะเวลาน้อย ดังรูปที่ 4.6 เมื่อพิจารณาเวลาที่เพิ่มขึ้น13 นาทีเป็น 27 นาทีพบว่ามีปริมาณ Methane yield ที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันโดยเปรียบเทียบค่า IMY ดังตารางที่ 4.7 ที่เวลา 13 นาทีมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ10.32 และร้อยละ 15.07 เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 27 นาที



รูปที่ 4.6 ปริมาณ Methane yield ที่ความเข้มข้น Total solid ร้อยละ 3.5 (w/v) เวลา 13 และ 27 นาที

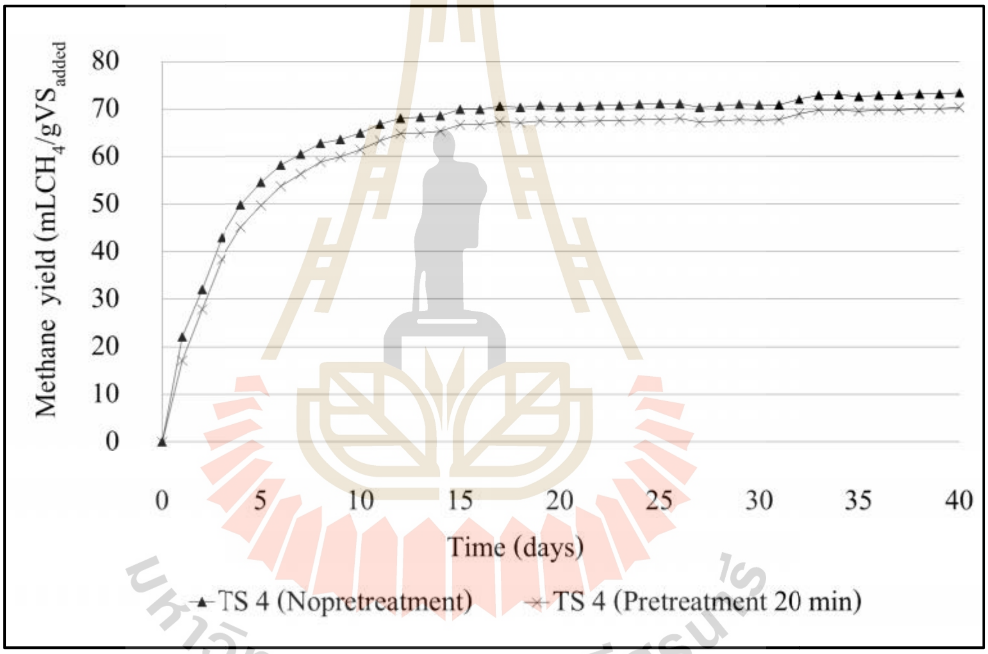
ตารางที่ 4.7 ปริมาณ Methane yield, อัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด และเวลาที่จุลินทรีย์ใช้ในการปรับตัวก่อนเพิ่มจำนวน จากการศึกษา BMP ของกากมันสำปะหลังความเข้มข้น (TS) ร้อยละ 3.5 (w/v) เวลา 13 และ 27 นาที

TS (ร้อยละ, w/v)	Methane yield ($mLCH_4/gVS_{added}$)	H ($mLCH_4$)	*Rm* ($mLCH_4$/d)	λ (d)
TS 3.5 (No pretreatment)	95.48±1.95	169.00	23.53	- 0.69
TS 3.5 (Pretreatment 13 min)	105.34±3.34	188.30	28.10	- 1.08
TS 3.5 (Pretreatment 27 min)	109.87±2.06	188.67	29.94	- 0.79

หมายเหตุ : ทุก ๆ ชุดการทดลองถูกหักจากชุดควบคุม(แก๊สที่เกิดขึ้นจาก seed)และปริมาณมีเทนปรับค่าที่สภาวะ(STP)

4.3.5 ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธี (Biochemical methane potential, BMP) ที่ความเข้มข้น (TS) ร้อยละ 4 (น้ำหนักต่อปริมาตร) และเวลาในการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค 20 นาที

จากการทดสอบพบว่าปริมาณ Methane yield ที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง (TS) ร้อยละ 4 (w/v) และเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายขั้นต้น 20 นาทีคือ 70.26±7.92 $mLCH_4/gVS_{added}$ อัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (*Rm*) มีค่า 23.42 $mLCH_4$ /d โดยพบว่าปริมาณ Methane yield มีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นคือ73.33 ±2.39 $mLCH_4/gVS_{added}$ อัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (*Rm*) มีค่า 26.16 $mLCH_4$ /d นอกจากนี้จากผลการทดลองจะพบว่าเวลาที่จุลินทรีย์ใช้ในการปรับตัวก่อนเพิ่มจำนวน (λ) จะใช้ระยะเวลาน้อย ดังรูปที่4.9 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่า IMY ดังตารางที่ 4.10 พบว่าที่เวลา 20 นาที มีค่าลดลงร้อยละ 4.18



รูปที่ 4.7 ปริมาณ Methane yield ที่ความเข้มข้น Total solid ร้อยละ 4 (w/v) เวลา 20 นาที

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.8 ปริมาณ Methane yield, อัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด และเวลาที่จุลินทรีย์ใช้ในการปรับตัวก่อนเพิ่มจำนวน จากการศึกษา BMP ของกากมันสำปะหลังความเข้มข้น (TS) ร้อยละ 4 (w/v) เวลา 20 นาที

TS (ร้อยละ, w/v)	Methane yield ($mLCH_4/gVS_{added}$)	H ($mLCH_4$)	*Rm* ($mLCH_4/d$)	λ (d)
TS 4 (No pretreatment)	73.33 ±2.39	176.29	26.16	- 0.81
TS 4 (Pretreatment 20 min)	70.26±7.92	168.71	23.42	- 0.68

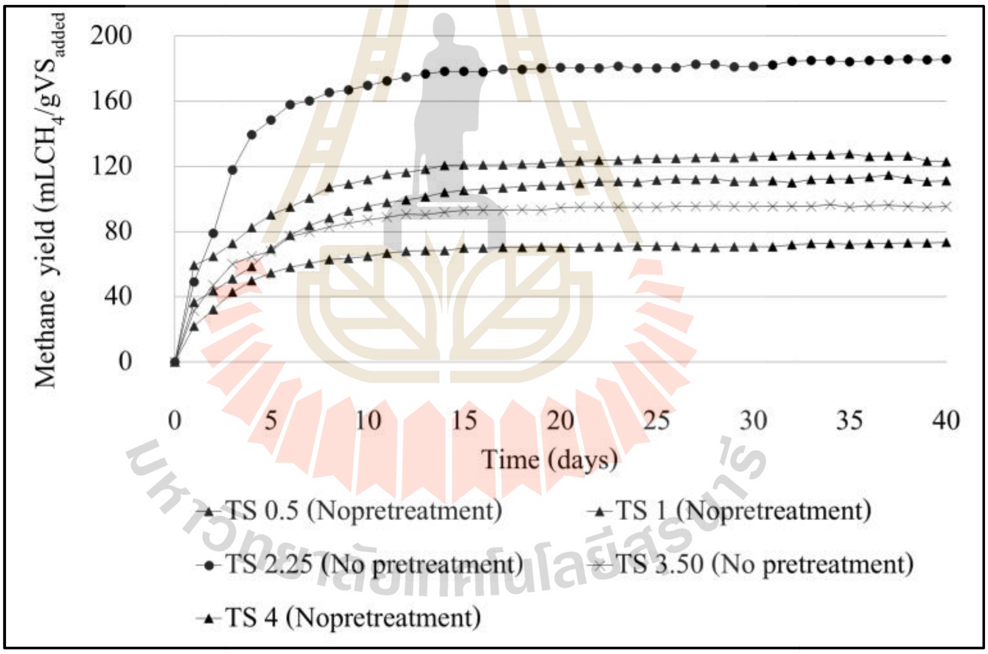
หมายเหตุ : ทุก ๆ ชุดการทดลองถูกหักจากชุดควบคุม (แก๊สที่เกิดขึ้นจาก seed) และปริมาณมีเทนปรับค่าที่สภาวะ (STP)

4.4 สรุปศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธี (Biochemical methane potential, BMP) ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง (TS) ร้อยละ 0.5 - 4 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ที่ไม่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค

จากผลการทดลองปริมาณ Methane yield ที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง (TS) ร้อยละ 0.5 - 4 (w/v) ที่ไม่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้น พบว่าปริมาณ Methane yield มีปริมาณเพิ่มขึ้นและลดลงดังรูปที่ 4.8 ปริมาณ Methane yield ที่มีค่ามากที่สุดคือ ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง (TS) ร้อยละ 2.25 ปริมาณ Methane yield ที่มีค่าน้อยที่สุดคือ ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง (TS) ร้อยละ 4 เนื่องจากกากมันสำปะหลังที่มีความเข้มข้นที่สูงหมายถึงมีปริมาณสารอาหารที่สูงไปด้วยดังนั้นเมื่อเทียบกับจำนวนจุลินทรีย์ที่มี โดยพิจารณาที่ สัดส่วนเชื้อจุลินทรีย์ต่ออาหาร (Inoculum to Substrate ratio, ISR) หมายถึงปริมาณของเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ทดลองต่อปริมาณของวัสดุที่ทำการศึกษา โดยหากเติมวัสดุในปริมาณน้อย ส่งผลให้สัดส่วน ISR มีค่ามาก ซึ่งหมายถึงในระบบมีปริมาณของจุลินทรีย์มากกว่าอาหาร ส่งผลให้การย่อยสลายสารอินทรีย์เกิดขึ้นสมบูรณ์กว่า จากงานวิจัยของ (Raposo *et al.*, 2006) ศึกษาผล BMP ของข้าวโพดที่สัดส่วนเชื้อจุลินทรีย์ต่อสารตั้งต้น (Inoculum to substrate ratio: ISR) เท่ากับ 3, 2, 1.5 และ 1 ที่อุณหภูมิ 35^{o}C พบว่ามีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดอยู่ระหว่าง 10 - 23 $mLCH_4/gVS_{added}$ ที่สัดส่วน IS = 3 และ 1 โดยที่สัดส่วน ISR = 1 ซึ่งมีปริมาณสารตั้งต้นมากที่สุดแสดงอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด (Neves *et al.*, 2004) ทำการศึกษา BMP ของขยะจากห้องครัวที่ ISR 2, 1, 0.74 และ 0.43 โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์แบบเป็นเม็ดและไม่เป็นเม็ด พบว่า เชื้อจุลินทรีย์ที่เป็นเม็ดไม่ทำให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ในช่วง ISR ที่ศึกษา แต่เชื้อจุลินทรีย์ที่ไม่เป็นเม็ดไม่เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ที่ ISR สูง(Zhang *et al.*,

2012) หมักมูลสุกรร่วมกับฟาง โดยศึกษาผลของ ISR ต่อกระบวนการผลิตกรดอินทรีย์ พบว่าปริมาณสัดส่วนของกรดอะซิติกในรูปปริมาณกรดไขมันทั้งหมด (total volatile fatty acids, TVFAs) เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 68.74, 72.02, 75.89 และ 86.65 ที่สัดส่วนของ ISR เท่ากับร้อยละ 6.68, 5.92, 5.54 และ 2.67 (w/v) ตามลำดับ

ดังนั้นความเข้มข้นของกากมันสำปะหลังที่มีปริมาณที่พอเหมาะกับจำนวนจุลินทรีย์จึงจะส่งผลให้มีศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนและผลต่ออัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (*Rm*) ที่ดีไปด้วยดังตารางที่ 4.9 นอกจากนี้จากผลการทดลองจะพบว่าเวลาที่จุลินทรีย์ใช้ในการปรับตัวก่อนเพิ่มจำนวน (λ) จะใช้ระยะเวลาน้อยเนื่องจากองค์ประกอบของกากมันสำปะหลังมีปริมาณแป้งเป็นองค์ประกอบร้อยละ 60 - 70 (น้ำหนักแห้ง) ซึ่งสามารถเป็นอาหารของจุลินทรีย์ได้ทันทีจึงเป็นผลให้ค่า (λ) มีค่าน้อย



รูปที่ 4.8 ปริมาณ Methane yield ที่ความเข้มข้น Total solid ร้อยละ 0.5 - 4 (w/v) No pretreatment

ตารางที่ 4.9 ปริมาณ Methane yield, อัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด และเวลาที่จุลินทรีย์ใช้ในการปรับตัวก่อนเพิ่มจำนวน จากการศึกษา BMP ของกากมันสำปะหลังความเข้มข้น (TS) ร้อยละ 0.5 - 4 (w/v) Nopretreatment

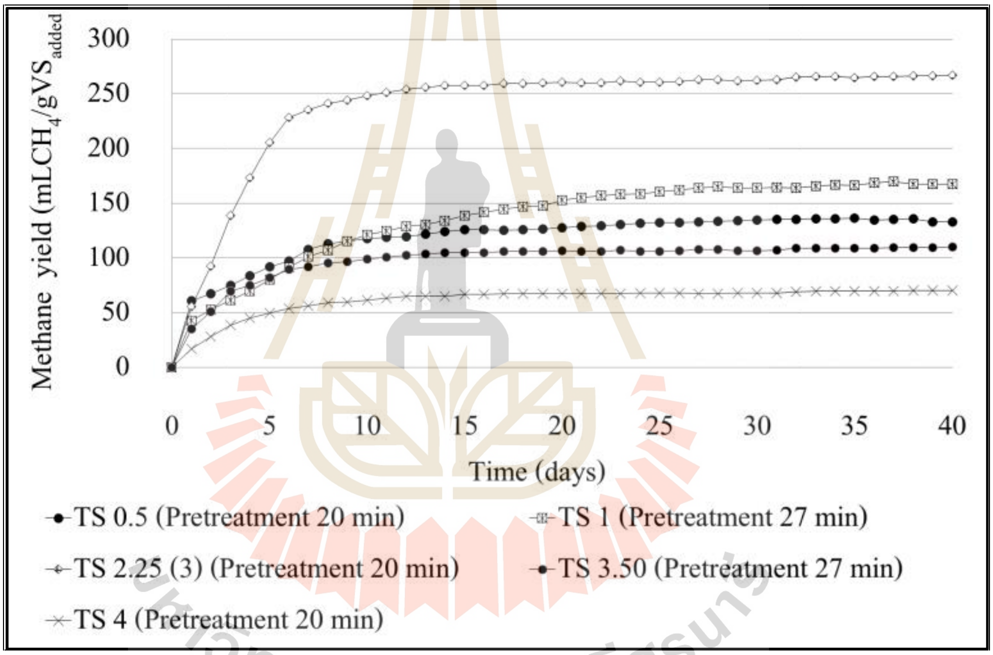
TS (ร้อยละ, w/v)	Methane yield ($mLCH_4/gVS_{added}$)	H ($mLCH_4$)	*Rm* ($mLCH_4/d$)	λ (d)
TS 0.5 (No pretreatment)	123.03 ±13.71	37.57	4.30	- 1.89
TS 1 (No pretreatment)	111.35 ±6.48	66.63	6.39	- 1.60
TS 2.25 (No pretreatment)	186.04 ±4.35	214.17	41.16	- 0.26
TS 3.5 (No pretreatment)	95.48 ±1.95	169.00	23.53	- 0.69
TS 4 (No pretreatment)	73.33 ±2.39	176.29	26.16	- 0.81

4.5 สรุปศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนด้วยวิธี (Biochemical methane potential, BMP) กากมันมันสำปะหลังที่ความเข้มข้น (TS) ร้อยละ 0.5 - 4 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคและมีค่าสูงที่สุดของแต่ละความเข้มข้น

จากตารางที่ 4.10 ผลการทดลองปริมาณ Methane yield ที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง (TS) ร้อยละ 0.5 - 4 (w/v) ที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้น พบว่าปริมาณ Methane yield มีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าลดลงที่ความเข้มข้น TS ร้อยละ 4 (w/v) ดังรูปที่ 4.9 พบว่าปริมาณ Methane yield ที่มีค่ามากที่สุดคือ กากมันสำปะหลัง (TS) ร้อยละ 2.25 (w/v) ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่ามีค่าน้อยกว่ามีเทนตามทฤษฎี (Stoichiometry) ที่ 341 $mLCH_4/gVS_{added}$ อยู่ร้อยละ 21.68 และเมื่อเทียบกับกากมันสำปะหลัง (TS) ร้อยละ 2.25 (w/v) ที่ไม่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นซึ่งมีค่าต่ำกว่าทางทฤษฎีร้อยละ 45.44 และปริมาณ Methane yield ที่มีค่าน้อยที่สุดคือกากมันสำปะหลัง (TS) ร้อยละ 4 (w/v) พบว่ามีค่าน้อยกว่ามีเทนตามทฤษฎี (Stoichiometry) อยู่ร้อย 79.39 เนื่องจากกากมันสำปะหลังที่มีความเข้มข้นที่สูงหมายถึงมีปริมาณสารอาหารที่สูงไปด้วยอีกทั้งเมื่อผ่านขั้นตอนกระบวนการย่อยสลายขั้นต้นทำให้เพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของสารละลาย (SCOD) เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเมื่อจำนวนจุลินทรีย์ที่มีอยู่จำกัดเปรียบเทียบกับปริมาณสารอาหารที่เพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสารอาหารเพื่อเปลี่ยนไปเป็นแก๊สมีเทนได้หมด โดยพิจารณาที่สัดส่วนเชื้อจุลินทรีย์ต่ออาหาร (Inoculum to Substrate ratio, ISR) หมายถึงปริมาณของเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ทดลองต่อปริมาณของวัสดุที่ทำการศึกษา โดยหากเติมวัสดุในปริมาณน้อย ส่งผลให้สัดส่วน ISR มีค่ามาก ซึ่ง

หมายถึงในระบบมีปริมาณของจุลินทรีย์มากกว่าอาหาร ส่งผลให้การย่อยสลายสารอินทรีย์เกิดขึ้นสมบูรณ์กว่า (Raposo et al., (2006)., Neves et al., (2004)., Zhang et al., (2012))

ดังนั้นความเข้มข้นของกากมันสำปะหลังที่มีปริมาณที่พอเหมาะกับจำนวนจุลินทรีย์จึงจะส่งผลให้มีศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนและผลต่ออัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด (*Rm*) ที่ดีไปด้วยดังตารางที่ 4.10 นอกจากนี้จากผลการทดลองจะพบว่าเวลาที่จุลินทรีย์ใช้ในการปรับตัวก่อนเพิ่มจำนวน (λ) จะใช้ระยะเวลาน้อยเนื่องจากองค์ประกอบของกากมันสำปะหลังมีปริมาณแป้งเป็นองค์ประกอบร้อยละ 60 - 70 (น้ำหนักแห้ง) ซึ่งสามารถเป็นอาหารของจุลินทรีย์ได้ทันทีจึงเป็นผลให้ค่า (λ) มีค่าน้อย



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 4.9 ปริมาณ Methane yield ที่ความเข้มข้น Total solid ร้อยละ 0.5 - 4 (w/v) Pretreatment

ตารางที่ 4.10 ปริมาณ Methane yield, อัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะสูงสุด และเวลาที่จุลินทรีย์ใช้ในการปรับตัวก่อนเพิ่มจำนวน จากการศึกษา BMP ของกากมันสำปะหลังความเข้มข้น (TS) ร้อยละ 0.5 - 4 (w/v) Pretreatment

TS (ร้อยละ, w/v)	Methane yield ($mLCH_4/gVS_{added}$)	H ($mLCH_4$)	*Rm* ($mLCH_4/d$)	λ (d)
TS 0.5 (Pretreatment 20 min)	132.86±13.54	39.48	4.34	- 2.14
TS 1 (Pretreatment 27 min)	167.59±1.58	99.41	6.50	- 2.68
TS 2.25 (3) (Pretreatment 20 min)	267.07±1.51	310.89	57.07	-
TS 3.5 (Pretreatment 27 min)	109.87±2.06	188.67	29.94	- 0.79
TS 4 (Pretreatment 20 min)	70.26±7.92	168.71	23.42	- 0.68

4.6 แบบจำลองพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Model) RSM

เมื่อนำผลปริมาณ Methane yield ที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์การถดถอยของพื้นผิวผลตอบโดยใช้โปรแกรม Essential regression พบว่าค่าการตอบสนองของ Methane yield สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 4.3 ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้น Total solid (w/v) และเวลา (นาที) ต่อการผลิต Methane yield ด้วยแบบจำลอง 3 มิติแสดงดังรูปที่ 4.10 และกราฟ Contour ดังรูปที่ 4.11

$$\text{Methane yield } (mLCH_4/gVS_{added}) = -256.36 + 269.45*X_1 + 21.80*X_2 - 60.34*X_1*X_1 - 0.454*X_2*X_2 - 0.783\,X_1*X_2 \quad (4.3)$$

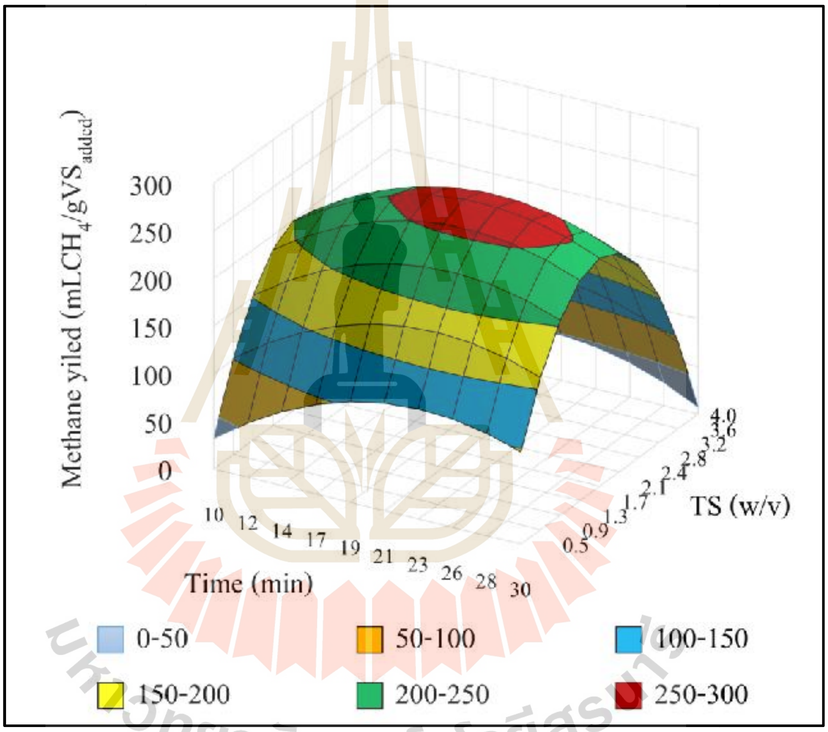
เมื่อ X_1 คือ ความเข้มข้น Total Solid ร้อยละ (น้ำหนักต่อปริมาตร)

X_2 คือ เวลาที่ใช้ในการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค (นาที)

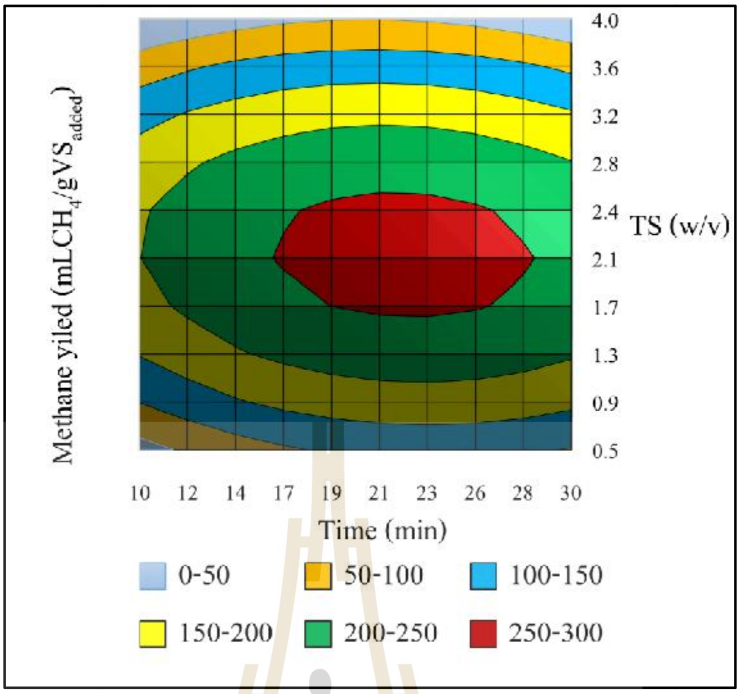
ผลของปริมาณ Methane yield ที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองสามารถเปรียบเทียบได้ดังแสดงในตางที่ 4.11 และพบว่าผลการทดลองที่ได้บางชุดมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองและในบางชุดก็มีค่าน้อยกว่าแบบจำลอง มีการกระจายของข้อมูลไม่มีทิศทางใดแน่นอนคือไม่ได้อยู่ทางด้านบวกหรือลบอย่างเดียว ถือว่าความเป็นอิสระอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (Montgomery and

Peck, 2006) รูปที่ 4.12 และสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Methane yield ที่ได้จากการทดลองและจากการทำนายของแบบจำลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.13

โดยมีค่า R^2 ระหว่างข้อมูลกับเส้นความสัมพันธ์สมบูรณ์ (Methane yield from model = Methane yield from experimental) เท่ากับ 0.931 และค่า Adj.R^2 เท่ากับ 0.861 และแบบจำลองดังสมการที่ 4.3 ได้ทำนายสภาวะที่เหมาะสมแก่การผลิต Methane yield คือที่ ความเข้มข้น TS (2.25) และเวลา (Time) 20 นาที มีการผลิต Methane yield เท่ากับ 263.56 $mLCH_4/gVS_{added}$



รูปที่ 4.10 ภาพจำลอง 3 มิติ

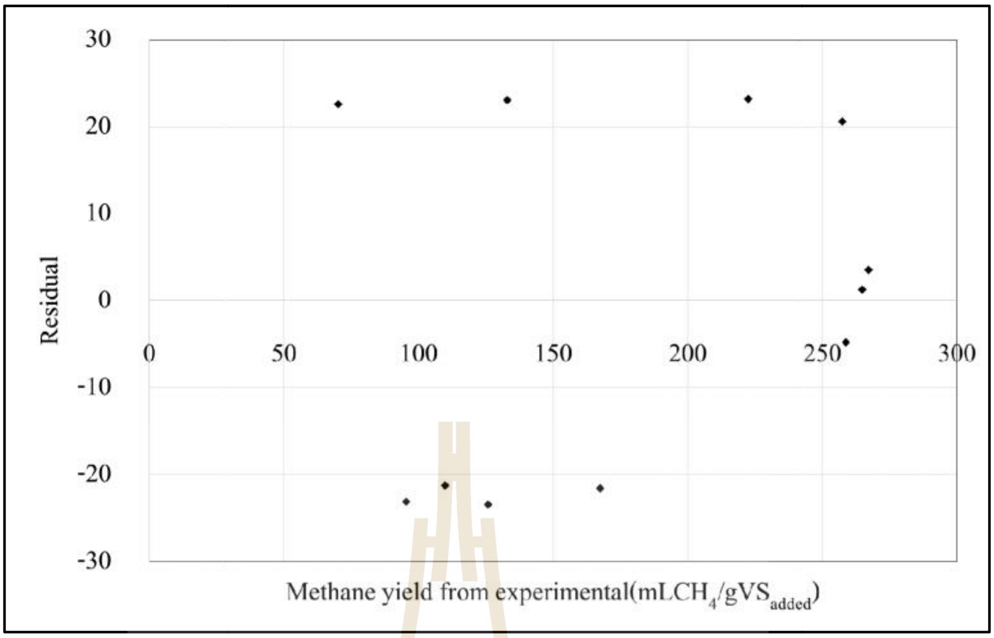


รูปที่ 4.11 กราฟ Contour

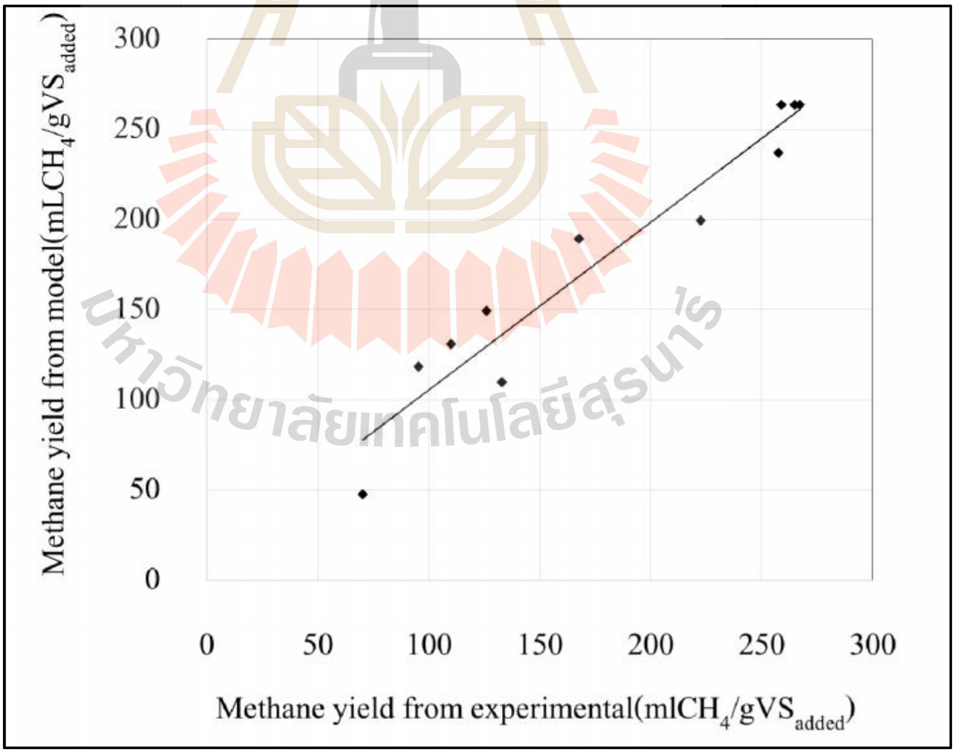
ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบ Methane yield ที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลอง

ชุดการทดลอง	Total solid	Time	Methane yield ($mLCH_4/gVS_{added}$)	
	(ร้อยละ, w/v)	(min)	ค่าจากการทดลอง	ค่าจากแบบจำลอง
1	0.5	20	132.86	109.81
2	1.0	13	125.79	149.22
3	1.0	27	167.59	189.19
4	2.25	10	222.58	199.40
5	2.25	20	264.81	263.56
6	2.25	20	258.77	263.56
7	2.25	20	267.07	263.56
8	2.25	30	257.52	236.91
9	3.5	13	95.48	118.57
10	3.5	27	109.87	131.12
11	4.0	20	70.26	47.71

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.12 ค่า Residual จากการทดลอง



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Methane yield ที่ได้จากการทดลองและการทำนายด้วยแบบจำลอง

เมื่อพิจารณาปัจจัยที่มีผลร่วมกันโดยทำการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการผลิต Methane yield ในสมการที่ 3.2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) คือ X_1 (ความเข้มข้น) รวมถึงค่าสัมประสิทธิ์ของ X_1^2 ด้วย (ตารางที่ 4.12) เนื่องจากการทดลองได้แบ่งความเข้มข้นจากค่าน้อยไปหามากแล้วจึงได้ทำการย่อยสลายขั้นต้น Mirshmadi et al., (2010) กล่าวว่า การย่อยสลายขั้นต้นนั้น มีประสิทธิภาพสูงในการลดคุณสมบัติความเป็นผลึกของเซลลูโลส และยังช่วยเพิ่มความสามารถในการเปลี่ยนรูปทางชีวภาพของลิกโนเซลลูโลสได้ดีขึ้น สำหรับชุดการทดลองที่สัดส่วนร้อยละ 4 พบว่ามีปริมาณ Methane yield ที่ผลิตได้ต่ำกว่าค่าอื่น เป็นผลเนื่องจากกากมันสำปะหลังมีองค์ประกอบของแป้งสูง ซึ่งมีความสามารถในการย่อยสลายได้รวดเร็ว ดังนั้นในระบบที่มีปริมาณกากมันสำปะหลังสูง จุลินทรีย์ในระบบมีแหล่งอาหารจำนวนมากส่งผลให้จุลินทรีย์ผลิตแก๊สมีเทนในระบบไม่สามารถเปลี่ยนกรดอินทรีย์เป็นแก๊สมีเทนได้ทัน จึงเกิดการสะสมกรดอินทรีย์ขึ้นในระบบ (Raposo et al., (2006)., Neves et al., (2004)., Zhang et al., (2012)) เป็นผลให้จุลินทรีย์ผลิตแก๊สมีเทนทำงานลดลง ดังเห็นได้จากปริมาณ Methane yield ที่มีค่าน้อยกว่า ดังนั้นความเข้มข้นของกากมันสำปะหลังจึงมีผลต่อการผลิต Methane yield โดยตรง และเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าสถิติโดยใช้ ANOVA (ตารางที่ 4.12) พบว่าสมการที่สร้างขึ้นไม่มี Lack of fit นั่นคือสมการที่ได้นั้น fit กับผลการทดลอง สามารถใช้สมการเพื่อทำนายค่าของ Methane yield ได้ และมีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (Coefficient of variation, CV) ซึ่งเป็นค่าใช้วัดการกระจายของข้อมูลตั้งแต่สองกลุ่มขึ้นไปไม่เกิน 30

ตารางที่ 4.12 ค่า Coefficients estimate และ P - values ของแต่ละปัจจัย

ปัจจัย	Coefficient estimate	P - value
Total solid (X_1)	269.45	0.003 [a]
Time (X_2)	21.80	0.089
Total solid*Total solid (X_1^2)	-60.34	0.0005 [a]
Time*Time (X_2^2)	-0.454	0.117
Total solid*Time (X_1*X_2)	-0.783	0.650

[a] มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.13 ตาราง ANOVA แสดงผลทำการถดถอย

Source	**Sum of squares**	**Mean square**	**F - value**	**P - value**
Regression	54176.6	10835.3	13.41	0.0006[a]
Lack of fit	4002.3	1334.1	72.453	0.014
Pure error	36.83	18.41		
Coefficient of variance (C. V.)	15.85			
R^2	0.931			

[a] มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

ตารางที่ 4.14 ผลสรุปความสัมพันธ์ของแบบจำลองพื้นผิวผลตอบ

R^2	Adji. R^2	RMSE	Mean	N
0.931	0.861	19	179	11

ตารางที่ 4.15 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ค่าคลาดเคลื่อน (Residual analysis)

Std.Residual		Shapiro - Wilk		Durbin - Watson	
Mean	SD				
0.00	0.6	P - value = 0.079	✓	1.632	✓

การวิเคราะห์ความเหมาะสมของแบบจำลองโดยพิจารณาจากการวิเคราะห์ค่าคลาดเคลื่อน (Residual analysis) โดยแบบจำลองที่เหมาะสม (Montgomery and Peck, 2006) ควรมีค่าเฉลี่ยของคลาดเคลื่อนเท่ากับศูนย์ มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเข้าใกล้ 1 ซึ่งจากการวิเคราะห์ค่าคลาดเคลื่อนพบว่ามีค่าเท่ากับศูนย์และมีค่า 0.6 ตามลำดับ จากนั้นทำการทดสอบการแจกแจงปกติของค่าคลาดเคลื่อนด้วยสถิติทดสอบ Shapiro - Wilk ($n<50$) และค่าคลาดเคลื่อนมีความเป็นอิสระต่อกัน Durbin - Watson พบว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (P - value = 0.079 ยอมรับ H_0 : ค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ) และผลทดสอบ Durbin - Watson มีค่า 1.632 (มีค่าเข้าใกล้ 2 อยู่ในช่วงยอมรับ H_0 : ค่าคลาดเคลื่อนมีความเป็นอิสระต่อกัน) ดังแสดงในตารางที่ 4.17

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการเพิ่มศักยภาพการผลิตไบโอมีเทนจากกากมันสำปะหลังโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิคในกระบวนการย่อยสลายขั้นต้นมีผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ผลกระทบของการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค

การย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารอินทรีย์โดยวัดจากซีโอดีที่ละลายในน้ำ (SCOD) ของกากมันสำปะหลังที่มีปริมาณ (TS) ร้อยละ 0.5 - 4 (w/v) และเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายขั้นต้นระหว่าง 10 - 30 นาที พบว่ามีปริมาณสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของซีโอดีที่ละลายในน้ำ (SCOD) มีปริมาณเพิ่มขึ้นทุกชุดการทดลอง โดยเมื่อเปรียบเทียบค่า $COD_{solubilisation}$ (%) มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.44 - 14.8

5.1.2 ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทน (BMP) ที่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้นโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิค

ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น (TS) ร้อยละ 0.5 (w/v) มีปริมาณ Methane yield เท่ากับ132.86±13.54 $mLCH_4/gVS_{added}$ กากมันสำปะหลังความเข้มข้น (TS) ร้อยละ1 (w/v) มีปริมาณ Methane yield 167.59±1.58 $mLCH_4/gVS_{added}$ กากมันสำปะหลังความเข้มข้น (TS) ร้อยละ 2.25 (w/v) มีปริมาณ Methane yield 267.07±1.51 $mLCH_4/gVS_{added}$ กากมันสำปะหลังความเข้มข้น (TS) ร้อยละ 3.55 (w/v) มีปริมาณ Methane yield 109.87±2.06 $mLCH_4/gVS_{added}$ กากมันสำปะหลังความเข้มข้น (TS) ร้อยละ 4 (w/v) มีปริมาณ Methane yield 70.26±7.92 $mLCH_4/gVS_{added}$ โดยมีค่า IMY เพิ่มขึ้นจากกากมันสำปะหลังที่เป็นชุดควบคุมร้อยละ 7.99 50.5 43.55 15.07 และสุดท้ายความเข้มข้น (TS) ร้อยละ 4 (w/v) มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ผ่านการย่อยสลายขั้นต้น

5.1.3 แบบจำลองพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Model, RSM)

แบบจำลองสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตร้าโซนิคนั้นเป็นการศึกษาปริมาณแก๊สมีเทนสะสมที่การย่อยสลายที่สภาวะต่าง ๆ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกากมันสำปะหลังและเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายขั้นต้นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค โดยการสร้างแบบจำลองพื้นผิวผลตอบ(Response surface model, RSM) และวางแผนการ

ทดลองแบบ central composite design (CCD) เมื่อนำผลปริมาณ Methane yield ที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์การถดถอยของพื้นที่ตอบสนองโดยใช้โปรแกรม Essential regression พบว่า R^2 เท่ากับ 0.931 และค่า Adj.R^2 เท่ากับ 0.861 ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของกากมันสำปะหลังและเวลาที่ใช้มีผลต่อการเกิดแก๊สมีเทน แบบจำลองได้ทำนายสภาวะที่เหมาะสมแก่การผลิต methane yield คือ ที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง (TS) ร้อยละ 2.25 (w/v) และเวลา 20 นาที มีการผลิต Methane yield เท่ากับ 263.56 $mLCH_4/gVS_{added}$

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) งานวิจัยนี้ยังขาดการนำผลการวิจัยที่ได้ไปใช้ในการเดินระบบจริงจากแบบจำลองที่วิเคราะห์ได้

2) ควรมีการประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิคในการย่อยสลายขั้นต้นร่วมกับวิธีอื่น ๆ และนำผลที่ได้ไปเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการเลือกวิธีการย่อยสลายขั้นต้นของวัสดุที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับการทดลองต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549. **การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศเพื่อการพัฒนาประสิทธิภาพเชิงเศรฐนิเวศน์อุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง** [ออนไลน์] ได้จาก : http://www2.diw.go.th/pic/dowload/guidlines/mis/NativeStiveStarchIndustry_Th.pdf 5 ธันวาคม 2555

กรมวิชาการเกษตร. 2555. **ระบบข้อมูลทางวิชาการ มันสำปะหลัง**. [ออนไลน์] ได้จาก : http://it.doa.go.th/vichakan/news.php?newsid=14. 14 ธันวาคม 2555.

กัลยา อยู่นาน. 2546. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำตาลจากเปลือกและกากมันสำปะหลัง, **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร คณะศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี**, หน้า 4-11.

กล้าณรงค์ ศรีรอด, เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, วัชรี เลิศมงคล, จำลอง เจียมจำนรรจา, ปิยะ ดวงพับตรา, เอ็จ สโรบล, ปิยะวุฒิ พูนสงวน, เจริญศักดิ์ โรจนฤธิ์พิเชษฐ์ และวิจารณ์ วิชุกิจ. (2542). การแปรรูปและการใช้ประโยชน์มันสำปะหลัง. **มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**, กรุงเทพฯ. 21 หน้ากิติยาพร สมบูรณ์. 2554. การเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังด้วย

เอนไซม์ผสมเซลลูเลสและเพคติเนส. **วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่**

กิตติกานท์ สุขวาณิชย์. 2554. การเปรียบเทียบการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังระหว่างกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและด่าง.**วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่**

ไกรวุฒิ พ่วงเดช. (2550). ผลการบำบัดขั้นต้นด้วยเอนไซม์ต่อการย่อยสลายกากมันสำปะหลังจากโรงงาน แป้งแบบไร้อากาศ.**วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี**

สถาบันเทคโนโลยีแก๊สชีวภาพ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. [ออนไลน์] ได้จาก : http://teenet.chiangmai.ac.th/btc/introbiogas02.php. 14 ธันวาคม 2555

ทรงศักดิ์ วัฒนชัยเสรีกุล. 2543. อาหารสัตว์จากกากมันสำปะหลังหมัก. **วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**, กรุงเทพฯ.

วีรชัย อาจหาญ และคณะ. 2552. **การพัฒนากระบวนผลิตวัตถุดิบจากมันสำปะหลังสำหรับอุตสาหกรรมเอทานอล**. ภาคีศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วรินธร สงคศิริ. 2553. การบำบัดและใช้ประโยชน์จากราก เหง้า กากมัน. Thailand Tapioca Starch. [ออนไลน์] ได้จาก : http://www.tha ilandtapiocastarch.net/technology-detail/2/1. 12 กรกฎาคม 2555

นริศรา สิทธิวงศ์ วิราวรรณ ภูล้นแก้ว แก้วตา สูตรสุวรรณ และลิขิต ศิริสันติเมธาคม. 2552. การผลิตแก๊สชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง. **แบบรายงานการวิจัย UGP 10. กาฬสินธุ์:มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตกาฬสินธุ์**. 6 หน้า.

นันทิกา คล้ายชม, เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ และอนุสิษฐ์ ธนะพิมพ์เมธา, 2554, การผลิตน้ำตาลรีดิวส์จากซังข้าวฟ่างโดยกระบวนการไฮโดรไลซีสด้วยกรด, **วิศวกรรมสาร มก.** 24: 91-102

มาศยา โชคสงวน. (2550). ผลของการบำบัดเบื้องต้นด้วยกรดต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง.วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม **มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี**

ไพบูลย์ แดงท่าขาม. (2551). การใช้มันสำปะหลังและกากมันสำปะหลังเป็นแหล่งพลังงานในการขุนโคนมลูกผสมเพศผู้. **วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.**

มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย. (2552). **ผลสำรวจมันสำปะหลัง** [ออนไลน์] ได้จาก : http://www.tapiocatthai.org/L1htm

สมาคมแป้งมันสำปะหลังไทย. 2550. **มันสำปะหลัง**. [ออนไลน์] ได้จาก : http://www.tapiocathai.org/ttsa /aboutus/aboutus2.htm. 11 พฤศจิกายน 2550.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2551. **มันสำปะหลังทำเป็นฝอย : ปริมาณและมูลค่าการส่งออกรายเดือน**. [ออนไลน์] ได้จาก :http://www.oae.go.th/statistic/export/ExCa1.xls. 2 กันยายน 2551

สวลี ดีประเสริฐ, ศุภชัย บุญนำมา, วิทยา บุตรทองมูล, บุปผา ชินเชิดวงศ์ และวีระ โลหะ.(2555). การใช้ประโยชน์จากกากมันสำปะหลังเพื่อผลิตเป็นน้ำตาล. **วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ.** 15(3), 39 - 46.

สิริวรรณ แก้วชิงดวง. (2554). การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากกากมันสำปะหลังโดยการ บำบัดขั้นต้น. **วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.**

สุทิศา เข็มผะกา. (2553). รายงานการวิจัยเรื่อง การใช้กากมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์สำหรับไก่เนื้อ. 42 หน้า

Abou-El-Enin, O.H., Fadel, J.G., Mackill, D.J. (1999). Differences in chemical composition and fibre digestion of rice straw with, and without anhydrous ammonia from 53 rice varieties. **Anim. Feed Sci. Technol**. 79, 129–136.

A. Kosugi, A. Kondo, M. Ueda, Y. Murata, P. Vaithanomsat, W. Thanapase, T. Arai, Y. Mori,Renew. 2009. Production of ethanol from cassava pulp via fermentation with a surface-engineered yeast strain displaying glucoamylase, **Renewable Energy**. 34 : 1354.

Alvira, P. et al. (2010). Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review. **Bioresource Technology.** (101) 4851–4861Avellar, B.K. and Glasser, W.G. (1988) Steam-assisted biomass fractionation. I. Process consideration and economic evaluation. **Biomass Bioenergy** 14 3, 205–218.

Balat, M., 2011, Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review, **Energy Convers. Manage**. 52: 858-875.

Brodeur, G., Yau, E., Badal, K., Collier, J., Ramachandran, K.B. and physicochemical pretreatment of lignocellulosic biomass: A review, **Enzyme Res.** p1: 1-17.

Cum, G. et al. (1988). Effect of static pressure on the ultrasonic activation of chemical reactions. Selective oxidation at benzylic carbon in the liquid phase. **J. Chem. Soc.** Perkin Trans. 2, 375-383.

Chaplin, M. (2001). Production of glucose syrup. [Online] jan 17. Available : http://www.sbu.ac.uk./biology/enztech/glucose.html

Dashtban, M., Schraft, H. and Qin, W., 2009, Fungal bioconversion of lignocellulosic residues; opportunities & perspectives. **Int. J. Biol**. Sci. 5: 578-595.

Sarnklong, C. et al. (2010). Utilization of rice straw and different treatments to improve its feed value for ruminants: a review. **Asian - Australasian Journal of Animal Sciences.** 011-2367**.**

Shen, H.Sh., Ni, D.B., Sundstøl, F. (1998). Studies on untreated and urea-treated rice straw from three cultivation seasons: 1. Physical and chemical measurements in straw and straw fractions. **Animal Feed Sci**. **Technol**. 73, 243–261.

Sun, Y., Cheng, J., (2002). Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production : a review. **Bioresource Technology**. 83, 1–11.

D. Ali, N. Soewarno, Sumarno, D. Primarini, and W.Sumaryono. 2011. Cassava pulp as a biofuel feed stock of an enzymatic hydrolysis process, **Makara Teknologi**. 15(2): 183-192.

D. Sreekanth, D. Sivaramakrishna, V. Himabindu, Y. Anjaneyulu. 2009. Thermophilic treatment of bulk drug pharmaceutical industrial wastewaters by using hybrid up flow anaerobic sludge blanket reactor, **Bioresource Technology**. 100 : 2534–2539.

Euis, H., Jun, i. A., Djumali, M., Titi, C. S., Ono, S., Bambang, P. (2011) . Hydrolysis of carbohydrates in cassava pulp and tapioca flour under microwave. **Indo . J. Chem**. 11: 238-245

Castrillon L., Fernandez-Nava Y., Ormaechea P., Marranon E. (2011). Optimization of biogas from cattle manure by pre – treatment with ultrasound co – digestion with crude glycerin. **Bioresoure Technology**, 102, 7845-7849.

Cesaro, A., & Belgiorno, V. (2014). Pretreatment methods to improve anaerobic biodegradability of organic municipal solid waste fractions. **Chemical Engineering Journal**, 240(0), 24-37.

Cheng, J., 2009, Biomass to Renewable Energy Processes, Taylor and Francis Group, **New York.**

Cum, G. et al. (1988). Effect of static pressure on the ultrasonic activation of chemical reactions. Selective oxidation at benzylic carbon in the liquid phase. **J. Chem. Soc.** Perkin Trans. 2, 375 - 383.

Gunaseelan V. Nallathambi. 2004. Biochemical methane potential of fruit and vegetable solids waste feedstock. **Biomass and Bioenergy 26**, no4(April): 389-399

Hendriks, A. T . and Zeeman, G., 2009. Pretreatments to enhace the digestibility of lignocellulose biomass [Review], **Bioresource Technology**. Vol.100 (1), pp. 10 – 18

Izumi, K., Okishio, Y.-k., Nagao, N., Niwa, C., Yamamoto, S., & Toda, T. (2010). Effects of particle size on anaerobic digestion of food waste. **International Biodeterioration & Biodegradation**, 64(7), 601-608.

I. Ferrer, M. Gamiz, M. Almeida, A. Ruiz. 2008. Pilot project of biogas production from pig manure and urine mixture at ambient temperature in Ventanilla (Lima, Peru), **Waste Management**. 29 : 168–173.

Jung, Y.H., Kim, I.J., Kim, H.K. and Kim, K.H., 2013, Dilute acid pretreatment of lignocelluloses for whole slury ethanol fermentation, **Biores. Technol.** 132:109-114.

K. Karim, K.T. Klasson, R. Hoffmann, S.R. Drescher, W.D. DePaoli, M.H. Al-Dahhan. 2005. Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mixing, **Bioresource Technology**. 96 : 1607–161

K. Raja Priya, S. Sandhya, K. Swaminathan. 2009. Kinetic analysis of treatment of formaldehyde containing wastewater in UAFB reactor, **Chemical Engineering Journal**. 148 : 212–216.

Khempaka, S., Molee, W. and Guillaume, M. (2009). Dried cassava pulp as an alternative feedstuff for broilers effect on growth performance, nutrient digestibility and carcass quality of broilers. **J. Poult. Sci.** 51: 71-79

Kumar, P., Barrett, D.M., Delwiche, M.J., and Stroeve, P., 2009, Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production, Ind. **Eng.Chem**. Res. 48:3713-3729.

Jain, P. and Vigneshwaran, N., 2012, Effect of Fenton's pretreatment on cotton cellulosic substrates to enhance its enzymatic hydrolysis response, **Biores. Technol.** 103: 219-226.

Li Y, Park S, Zhu J. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. Renew Sustain Energy Rev 2011;15:821- 6

Neves L, Oliveira R, Alves MM.Influence of inoculum activity on the biomethanization of kitchen waste under different waste/inoculum ratios. **Process Biochem 2004**.39: 2019–24.

Oliver, J.H., Hyunook, K. and Pen-Chi, C., 2000, Decolorization of wastewater, Crit. Rev. **Environ. Sci. Tech**. 30: 499-505.

Pandey, A., Soccol, C. R., Nigam, P., Soccol, V. T., Vanderbergehe, L. P. S., Mohan, R. (2000). Biotechnological potential of agro-industrial residue. II: cassava bagasse. **Bioresource Technology**. 100 : 1957–1962.

Panichnumsin, P., Nopharatana, A., Ahring, B. and Chaiprasert, P. 2012. Enhanced biomethanation in co-digestion of cassava pulp and pig manure using a Two-phase anaerobic system. **Journal of Sustainable Energy and Environment**. 3:73-79.

Pejo, E.T., Olive, J.M. and Ballesteros, M., 2008, Realistic approach for full-scale bioethanol production from lignocelluloses: A review, **J. Sci. Ind. Res**. 67: 874-884.

R. Torres-Castillo, P.Llabres-Luengo, J. Mata-Alvarez. 1995. Temperature effect on anaerobic digestion straw in a one phase system at different inocolum concentration,

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Agriculture Ecosystems&Environment. 54 : 55-56.

Raposo, F. Banks, C.J., Siegert, I., Heaven, S., Borja, R. 2006. Influence of inoculums to substrate ratio on the biochemical methane potential of maize in batch tests, **Process Biochemistry**. 41:1444-1450.

Shuzhen Z., Xiaojiao W., Yuanlin C., Haiewn W., Yongzhong F. (2016). Enhancement of biogas production in anaerobic co-digestion by ultrasonic pretreatment. **Energy Conversion and Management**, 112, 226 – 235.

Siriporn, C., Yuka, M., Wonop, V., Kota, O., Gaku, H. L., Kazuhiko, I. (2012). Application of thermphilic enzymes and water jet system to cassava pulp. **Bioresource Technology**.126: 87-91

Srirot, K., Suntisopasri, V., Petchalanuwat, C., Kurotjanawong, K. and Oattes, C. G. (1999). Cassava starch Granule structure – function properties: Influence of time and conditions at harvest on four cultivars of cassava starch. **In carbohydrate polomer.** 38: 161 - 170

Sriroth, K., R. Chollakup, S. Chotneeranat, K. Piyachomkwan and C. G. Oates. (2000). Processing of cassava waste for improved biomass utilization**. Bioresource Technology**. 71: 63-69.

Sriroth, K. (2006). Outlook og biomass utilizationas biofuel in thailand. Aug 14 Available : http://unit.aist.go.jp/internat/biomasswsAccessed

Sinnaraprasat, S. and Fongsatitkul, P., 2011, Optimal condition of fenton's reagent to enhance the alcohol production from palm oil mill effluent (POME), **Environmental Asia** 4 (2): 9-16.

Sun, Y. and Cheng, J., 2002, Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: A review, **Biores. Technol**. 83: 1-11.

Suslick, K., S. (1989). **Scientific American**. 62.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Suksombat, W., Lounglawan, P. and Noosen, P. (2006). Energy and protein evauation of five feedstuffs used in diet in which cassava pulp as main energy source for lactating dairy cows.Suranaree **J.Sci.technol**. 14: 99 – 107

Taherzadeh, M.J., Karimi, K., (2008). Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: a review. **Int. J. Mol. Sci**. 9, 1621–1651.

Timothy, J. M. (1991). **Practical Sonochemistry. Ellis Horwood Limited. England.**

Rattanachomsri, U., Tanapongpipat, S., Eurwilaichitr, L., and Champreda, V. (2009). Simultaneous non-thermal saccharification of cassava pulp by multi-enzyme activity and ethanol fermentation by Candida tropicalis. J. **Bioscience and Bioengineering**. 107 : 488-493.

Vadivelloo, J. (2000). Cellulase degradation of whole rice straw. **J. Anim. Feed Sci. Technol**. 9, 157–166.

Ververis, C., Georghoiou, K., Danielidis, D., Hatzinikolaou, D.G., Santas, P., Santas, R. and Corletti, V. (2007).Cellulose, hemicellulose, lignin and ash contentvof some organic materials and their suitability for use as paper pulp supplements. **Bioresource Technology**. 98 : 296–301.

Y. Zheng, Z. Pan, R. Zhang, M. Hamed, El-Mashad, J. Pan, B.M. Jenkins. 2009. Anaerobic digestion of saline creeping wild ryegrass for biogas production and pretreatment of particleboard materia, **Bioresource Technology**. 100 : 1582–1588.

Mosier, N., Hendrickson, R.,Ho,N.,Sedlak,M., Ladisch, M.R.,2005a. optimization of pH controlled liquid hot water pretreatment of cron stover.**Bioresour.technol**. 96, 1986-1993

Mosier, N., Wyman, C., Date, B., Elander, R., Lee, Y.Y., Holtzapple, M., Ladisch, M., 2005b. Feature of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass . **Bioresour.Technol**.96, 673 -686.

Mshandete, A., Björnsson, L., Kivaisi, A. K., Rubindamayugi, M. S. T., & Mattiasson, B. (2006).

Effect of particle size on biogas yield from sisal fibre waste. **Renewable Energy**, 31(14), 2385-2392.

Xiao W.P. and Clarkson W.W., 1997, "Acid Solubilization of linin and bioconversion of treated newsprint to methane", **Biodegradation**, Vol. 8, pp. 61 – 66

Zhao, R., Zhang, Z., Zhang, R., Li, M., Lei, Z., Utsumi, M. and Sugiura, N., 2010, "Methane production from rice straw pretreated by mixture of acetic – propionic acid", [Research Support, Non – U.S. Gov't], **Bioresource Technology**, Vol. 101(3), pp. 990 – 994.

Zhang, Q., Tang, L., Zhang, J., Mao, Z. and Jiang, L., 2010 Optimization of thermal – dilute sunfuric acid pretreatment for enhancement of methane production from cassava residues.**Bioresour.technol**.vol 102(4) 395-3956.

Zhang, Q., Tang, L., Zhang, J., Mao, Z. and Jiang, L., 2011, "Optimization of thermal – dilute sulfuric acid pretreatment for enhancement of methane production from cassava residues", [Research Support, Non – U.S. Gov't], **Bioresource Technology**, Vol. 102(4), pp. 3958 - 3965.

Zhang, Q., Zhu, X., Kong, L., Yuan, G., Zhai, Z., Liu, H., Guo, X. 2013. Comparative assessment of Methanogenic step single and two-stage process without or with a previous hydrolysis of cassava distillage. **Bioresource Technology**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ

วิธีวิเคราะห์ Neutral Detergent Fiber (NDF) (Goering and Van Soest, 1970**)**

อุปกรณ์

1. ครูซิเบิ้ล (Fritted glass Crucible) ขนาด 50 ml.
2. ตู้อบแห้ง (Hot air oven)
3. โถดูดความชื้น (Dessicator)
4. เครื่องชั่งชนิดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
5. บีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 600 ml.
6. เครื่องวิเคราะห์เยื่อใย แบบ Manual
7. ขวดฉีดน้ำ (wAsh bottle)
8. ขวดต้มน้ำร้อน (Boiling flask)
9. เครื่องต้มน้ำร้อน
10. เครื่องดูดสุญญากาศ

สารเคมี

1. Sodium lauryl sulphate (USP หรือ purified grade)
2. Disodium ethylenediaminetetraacetate (EDTA) dihydrate, crystal, reagent grade
3. Sodium borate decahydrate (Na2B4O7.10H2O, reagent grate)
4. Disodium hydrogen phosphate anhydrous (Na2HPO4), reagent grade
5. Triethylene glycol, reagent grade
6. Sodium sulphite anhydrous, reagent grade
7. Acetone (AR grade) ชนิดที่ปราศจากสี และสามารถระเหยได้หมด ไม่มีสิ่งตกค้างเหลืออยู่
8. α – Amylase EC number 3.2.1.1 ชนิด heat – stable
9. Distiled or deionized water

วิธีเตรียมสารละลาย Neutral Detergent Fiber 2 ลิตร

- Sodium lauryl sulphate (USP หรือ purified grade)

- Disodium ethylenediaminetetraacetate (EDTA) dihydrate, crystal, reagent grade
- Sodium borate decahydrate ($Na_2B_4O_7.10H_2O$, reagent grate)
- Disodium hydrogen phosphate anhydrous (Na_2HPO_4), reagent grade
- Triethylene glycol , reagent grade
- Distiled or deionized water

วิธีหาเตรียม

1. ชั่ง Sodium lauryl sulphate 60 กรัม ใส่ใน Beaker ขนาด 400 มิลลิลิตร แล้วนำมาใส่ใน Volumetric flask ขนาด 2 ลิตรโดยใช้กรวยกรองและแท่งคนสารละลายช่วย เสร็จแล้วล้าง Sodium lauryl sulphate ที่ติดค้างอยู่ใน Beaker ด้วยน้ำร้อน โดยใช้ขวดฉีดน้ำร้อน ฉีดแล้วเทรวมใส่ใน Volumetric flask เดิม เขย่าเบา ๆ
2. เติม Triethylene glycol 20 มิลลิลิตร ใส่ลงใน Volumetric flask ในข้อ (1) เขย่าให้เข้ากัน
3. ละลาย Disodium hydrogen phosphate anhydrous (Na_2HPO_4) 9.12 กรัม , Sodium borate decahydrate ($Na_2B_4O_7.10H_2O$) 13.62 กรัม และ Disodium ethylenediaminetetraacetate (EDTA) dehydrate 37.22 กรัม ด้วยน้ำกลั่นที่ร้อนแล้วนำมาผสมกับสารละลาย ในข้อ (2) เทใส่ Volumetric flask เขย่าให้เข้ากัน แล้วเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตรปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วปรับ ปริมาตรพอดีขีดด้วยน้ำกลั่นและปรับ pH ให้ได้ 6.9 - 7.1

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำเตือนในความปลอดภัย

1. Acetone เป็นสารระเหยและติดไฟง่าย ไม่ให้ระเหยสะสมอยู่ในพื้นที่ทำงาน ใช้อุปกรณ์กำจัดกลิ่น ไอและหลีกเลี่ยงการสูดดมหรือสัมผัสกับผิว ทำการระเหย Acetone ในตัวอย่างที่บรรจุใน Crucible ก่อนเข้าตู้อบแห้ง
2. Sodium lauryl sulphate เป็นสารระคายเคืองที่เยื่อบุผิว ควรสวมหน้ากากกันฝุ่นและสวมถุงมือ ในขณะปฏิบัติการเตรียมสารละลาย

วิธีการ

1. นำ Crucible ขนาด 50 ml. ไปอบในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 105 ^{0}C นาน 2 ชั่วโมง เอาออกใส่ใน โถดูดความชื้น (Dessicator) ทิ้งให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนักบันทึกไว้
2. ชั่งตัวอย่างที่แห้งและบดละเอียด ขนาด 1 มิลลิเมตร 0.5-1.0 กรัม ใส่ใน Beaker ปาก กลมเรียบ ขนาด 600 มิลลิลิตร (ใส่ Na_2SO_3 0.5 กรัม ในตัวอย่างที่มี cutin) สูงลงไปใน Beaker ที่มีตัวอย่างใบเดิม
3. นำสารละลาย Neutral Detergent Fiber ไปต้มให้ร้อน ประมาณ 5 นาที แล้วตวงใส่ลง ใน Beaker ที่มีตัวอย่างอยู่ 50 มิลลิลิตรโดยใช้กระบอกตวง นำไปทำการย่อย หลัง 5 นาที เขย่า Beaker แล้วยกลง ในตัวอย่างที่กรองยากจะเติม 0.1 ml. สารละลายมาตรฐาน α-amylase เขย่าให้สารละลายมาตรฐาน α-amylase กับสารละลาย Neutral Detergent Fiber ผสมกัน แล้วยกขึ้นวางบนเครื่องวิเคราะห์เยื่อใย ทำการ Reflux ต่อ 60 นาที
4. ทำการกรอง โดยเทสารละลายใน Beaker ลงใน Crucible ที่ชั่งน้ำหนักแล้วที่ต่อติดกับเครื่องดูดสุญญากาศ ล้างตัวอย่างที่อยู่ใน Beaker ด้วยน้ำร้อน จนกระทั่งตัวอย่างส่วนที่เหลือทั้งหมดลงใน Crucible จนหมด
5. ล้างตัวอย่างใน Crucible ด้วยน้ำร้อนอีกจนหมดฟอง แล้วใช้ขวดฉีดน้ำร้อน ล้างตัวอย่างที่ ติดอยู่ข้าง Crucible ลงให้หมดแล้วดูดน้ำใน Crucible ออก
6. จากนั้นล้างตัวอย่างด้วย Acetone 3-5 ครั้ง หรือจนกระทั่งสารละลายล้างออกจาก Crucible ไม่มีสี
7. นำ Crucible ที่มีตัวอย่าง ไปอบในตู้อบแห้ง (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105 ^{0}C นาน 8 ชั่วโมง หรือตลอดคืน
8. นำ Crucible ที่มีตัวอย่างออกจากตู้อบแห้ง (Hot air oven) เอาใส่ในโถดูดความชื้น (Dessicator) ปล่อยให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาค่า NDF
9. นำ Crucible เผา (Ignite) ในเตาเผา ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง
10. เอาออกใส่ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็น ชั่งน้ำหนักหา Ash

วิธีคำนวณ

1. ในกรณีที่ตัวอย่างนั้นวิเคราะห์หาเฉพาะค่า NDF

%NDF = [(W1- W2 x 100] - % nuetral insoluble Ash W3

เมื่อ W1= น้ำหนัก Crucible + น้ำหนักตัวอย่าง

W2= น้ำหนัก Crucible

W3= น้ำหนักตัวอย่าง

%NDF insoluble Ash คือ % Ash ที่ได้จากขั้นตอนการเผาในการวิเคราะห์หา NDF

2. ในกรณีที่ตัวอย่างนั้นวิเคราะห์หาค่า Lignin ด้วย

%NDF = ([(W1- W2 x 100] - % Acid insoluble Ash)/W3

เมื่อ W1= น้ำหนัก Crucible + น้ำหนักตัวอย่าง

W2= น้ำหนัก Crucible

W3= น้ำหนักตัวอย่าง

%Acid insoluble Ash คือ % Ash ที่ได้จากขั้นตอนการเผาในการวิเคราะห์หา lignin

%NDS = 100 - (%Moisture) - (%NDF)

ก 1. วิธีวิเคราะห์ Acid Detergent Fiber (ADF) (Goering and Van Soest, 1970**)**

อุปกรณ์

1. ครูซิเบิ้ล (Fritted glass crucible) ขนาด 50 ml.
2. ตู้อบแห้ง (Hot air oven)
3. โถดูดความชื้น (Dessicator)
4. เครื่องชั่ง (Balance) ชนิดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
5. บีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 600 ml.
6. เครื่องวิเคราะห์เยื่อใย แบบ manual
7. ขวดฉีดน้ำ (wAsh bottle)
8. ขวดต้มน้ำร้อน (Boiling flask)
9. เครื่องต้มน้ำร้อน
10. เครื่องดูดสุญญากาศ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารเคมี

1. Sulfuric acid (H_2SO_4), reagent grade
2. Cetyl triethyl ammonium bromide (CTAB), reagent grade
3. Acetone, reagent grade
4. Distilled or deionized water

วิธีเตรียมสารละลาย Acid Detergent Fiber

1. ชั่งซัลฟุริกเข้มข้น (H_2SO_4 conc, AR grade) 51.08 กรัม ใส่ใน Beaker ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วเทใส่ Volumetric flask ขนาด 1 ลิตร ที่มีน้ำกลั่นอยู่ประมาณ 200 มิลลิลิตร
2. ล้างกรดที่อยู่ใน Beaker ด้วยน้ำกลั่น 2 ครั้ง แล้วเทลงใน Volumetric flask เดิม แล้วเขย่าให้ เข้ากัน
3. เติมน้ำกลั่นให้พอดีขีด ปิดฝา เขย่า 3 ครั้งให้เข้ากัน ปล่อยทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
4. ปรับปริมาตรพอดีขีด Volumetric flask ขนาด 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น เขย่า 2-3 ครั้งให้เข้ากัน
5. หาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย H_2SO_4 ด้วยการไทเทรตกับ NaOH
   - ปิเปตสารละลายที่เตรียมได้มา 20 ml. ใส่ลงใน flask ขนาด 250 ml. หยดฟีนอลพทาลีน 3 หยด ไทเทรตสารละลายด้วยสารละลาย NaOH ที่ทราบความ เข้มข้นแล้ว จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพูอ่อน
   - ทำการทดลองซ้ำ อีก 1 ครั้ง บันทึกผลการทดลองและคำนวณผลที่ได้ หาความ เข้มข้นเฉลี่ยของสารละลาย H_2SO_4
6. ชั่ง CTAB 20 กรัม ลงใน Beaker ขนาด 250 มิลลิลิตร เทใส่ลงในขวดสำหรับเก็บสารละลาย Acid Detergent Fiberโดยใช้กรวยกรองและแท่งคนสารละลายช่วย ล้าง CTAB ที่ติดค้างใน Beaker ด้วยสารละลาย Sulfuric acid ความเข้มข้น 1 นอร์มอล แล้วใส่ลงในขวดเก็บ สารละลาย Acid Detergent Fiber ที่มี CTAB อยู่แล้ว 3 ครั้ง เขย่าให้เข้ากัน แล้วเทกรดซัลฟุริกที่ เหลือใส่ในขวดสารละลาย Acid Detergent Fiber และเขย่าให้เข้ากัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิธีการ

1. นำ Crucible ขนาด 50 ml.ไปอบในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 105 °C นาน 2 ชั่วโมง เอาออกใส่ในโถดูดความชื้น (Desiccator) ทิ้งให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนักและบันทึกไว้
2. ชั่งตัวอย่างที่แห้งและบดละเอียด ขนาด 1 มิลลิเมตร 1 กรัม ใส่ใน Beaker ปากกลมเรียบ ขนาด 600 มิลลิลิตร
3. นำสารละลาย Acid Detergent ไปต้มให้ร้อน ตวงใส่ลงใน Beaker ที่มีตัวอย่างอยู่ 100 มิลลิลิตร โดยใช้กระบอกตวง นำไปทำการย่อย หรือ Reflux นาน 1 ชั่วโมง โดยใช้เครื่อง วิเคราะห์เยื่อใยชนิด Manual
4. ทำการกรอง โดยเทสารละลายใน Beaker ลง Crucible ที่ชั่งน้ำหนักแล้วที่ต่อติดกับเครื่อง กรองดูดสุญญากาศ ล้างตัวอย่างที่อยู่ใน Beaker ด้วยขวดฉีดน้ำร้อน จนกระทั่งตัวอย่างส่วนที่ เหลือทั้งหมดลงใน Crucible จนหมด ล้างตัวอย่างที่อยู่ใน Crucible 1,200 ml. หรือจนหมด ฟอง
5. ล้างตัวอย่างที่ติดอยู่ข้าง Crucible ด้วยน้ำร้อนอีก 1-2 ครั้ง โดยใช้ขวดฉีดน้ำ แล้วดูดน้ำออก ด้วย Vacuum pump
6. จากนั้นล้างตัวอย่างด้วย Acetone 3 ครั้ง หรือจนกระทั่งสารละลายที่ไหลออกจาก Crucible ไม่มีสี
7. นำ Crucible ที่มีตัวอย่างไปอบในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 105 ^{0}C นาน 8 ชั่วโมง หรือตลอดคืน
8. นำ Crucible ที่มีตัวอย่างออกจากตู้อบ เอาใส่ในโถดูดความชื้น (Dessicator) ปล่อยให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาค่า ADF
9. นำ Crucible เผา (Ignite) ในเตาเผา ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง
10. เอาออกใส่ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็น ชั่งน้ำหนักหา Ash

วิธีคำนวณ

1. ในกรณีที่ตัวอย่างวิเคราะห์เฉพาะค่า ADF

%ADF =[[(W1 – W2) x 100] - %Acid Insoluble Ash] /W3

เมื่อ

W1 = น้ำหนัก Crucible + น้ำหนักตัวอย่าง

W2 = น้ำหนัก Crucible

W3 = น้ำหนักตัวอย่าง

%Acid insoluble Ash คือ % Ash ที่ได้จากขั้นตอนการเผาในการวิเคราะห์หา ADF

2. ในกรณีที่ตัวอย่างนั้นวิเคราะห์หาค่า Lignin ด้วย

%ADF =[[(W1- W2 x 100] - % Acid insoluble Ash/W3]

เมื่อ

W1= น้ำหนัก Crucible + น้ำหนักตัวอย่าง

W2= น้ำหนัก Crucible W3= น้ำหนักตัวอย่าง

%Acid insoluble Ash คือ % Ash ที่ได้จากขั้นตอนการเผาในการวิเคราะห์หา lignin

การคำนวณหาปริมาณเยื่อใย Hemicellulose

% Hemicellulose = %NDF - %ADF

ก 2. วิธีวิเคราะห์ Acid Detergent Lignin (ADL) (Goering and Van Soest, 1970**)**

อุปกรณ์

1. ถาดที่ทำด้วยโลหะสเตนเลส
2. Beaker ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. แท่งแก้วคนสารละลาย
4. ขวดต้มน้ำร้อน
5. ขวดฉีดน้ำ
6. เครื่องต้มน้ำร้อน
7. Vacuum pump
8. ตู้อบแห้ง
9. โถดูดความชื้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

10.เครื่องชั่ง (balance) ชนิดทศนิยม 4 ตำแหน่ง

สารเคมี

1. Sulfuric acid conc, AR grade
2. Distilled or Deionized water

วิธีเตรียมสารละลาย 72% H_2SO_4

1. ตวง H_2SO_4 conc. 670 มิลลิลิตร ค่อยๆเทอย่างช้าๆ ลงใน Beaker ขนาด 1,000 มิลลิลิตร ที่มีน้ำกลั่นอยู่แล้ว 100 มิลลิลิตร พร้อมกับใช้แท่งแก้วคนให้สารละลายเข้ากันเป็นระยะ ในขณะที่เตรียมสารละลายนี้ต้องให้ Beaker อยู่ในอ่างน้ำเย็นตลอดเวลา
2. นำกระจกนาฬิกามาปิดไว้รอจนสารละลายเย็นที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส
3. เมื่อสารละลายเย็นลงเติมน้ำกลั่นลงไปให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร คนสารละลายให้เข้ากันอีกครั้ง เอากระจกนาฬิกามาปิด ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส
4. เมื่อสารละลายเย็นลง เทใส่ลงในขวดสำหรับเก็บสารละลาย 72 %H_2SO_4 ก่อนนำสารละลาย 72 %H_2SO_4 มาใช้จะต้องวัดความถ่วงจำเพาะของสารละลายนี้ให้ได้ 1.643 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสในการวัดเพื่อหาความถ่วงจำเพาะ 1.643 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส นั้น เริ่มจาก วางขวดสารละลาย 72%H_2SO_4 ลงในอ่างน้ำเย็น ใช้ปรอทวัดอุณหภูมิพออุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ยกขึ้นจากอ่างน้ำเย็นเขย่าสารละลายกรดซัลฟุริกเข้มข้น 72% ในขวดเก็บสารละลายให้เข้ากันแล้วเทลงในกระบอก ตวงขนาด 500 มิลลิลิตร ใช้เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะวัดให้ได้เท่ากับ 1.643 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ถ้าค่าที่วัดได้สูงกว่า 1.643 ให้ค่อยๆเติมน้ำกลั่นลงไป แต่ถ้าต่ำกว่า 1.643 ให้เติมกรดซัลฟุริกเข้มข้นลงไปจนกว่าจะวัดได้ค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 1.643 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส จึงจะ นำไปใช้ได้

วิธีการ

1. นำ Crucible ที่มีตัวอย่างซึ่งวิเคราะห์หา ADF แล้วมาเติมสารละลาย 72% H_2SO_4 ที่เย็น (20 องศาเซลเซียส) ลงไป ประมาณครึ่ง Crucible จากนั้นนำไปวางลงในถาดสเตนเลส ใช้แท่งแก้วคนให้ ทั่วเพื่อให้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตัวอย่างแยกจากกันไม่จับกันเป็นก้อน โดยมีน้ำกลั่นที่อยู่ในถาดสเตนเลสระดับที่ต่ำ กว่าระดับของแผ่น fritted glass รักษาอุณหภูมิของ Crucible ในถาดสเตนเลสที่ 20 องศาเซลเซียส - 23 องศาเซลเซียส

2. คอยเติมสารละลาย 72% H_2SO_4 เมื่อสารละลายใน Crucible แห้ง คนเป็นระยะๆ ใช้เวลา ย่อยนาน 3 ชั่วโมง
3. จากนั้นนำไป suction เพื่อล้างสารละลายกรดออก แล้วล้างด้วยน้ำร้อน โดยใช้น้ำร้อนปริมาณ 1,400 มิลลิลิตร หรือจนหมดกรด จากนั้นใช้ขวดฉีดน้ำร้อน ไล่ตัวอย่างที่ติดอยู่ข้าง Crucible ให้ลงไปใน Crucible ให้หมด แล้วฉีดล้าง Crucible อีกหนึ่งครั้ง
4. นำ Crucible พร้อมตัวอย่างที่ย่อยแล้ว ไปอบในตู้อบแห้ง (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 8 ชั่วโมง จากนั้นนำออกใส่โถดูดความชื้น (Dessicator) ปล่อยให้เย็น แล้วชั่ง น้ำหนักและบันทึกไว้

% Cellulose = (W1 - W4 x 100)/W3

เมื่อ

W1 = น้ำหนัก Crucible + น้ำหนัก ADF

W4 = น้ำหนัก Crucible + น้ำหนักเยื่อใยหลังการอบ

W3 = น้ำหนักตัวอย่าง

ก 3. วิธีวิเคราะห์ Lignin (Goering and Van Soest, 1970)

อุปกรณ์

1. เตาเผา (Muffle furnace)
2. โถดูดความชื้น (Dessicator)
3. เครื่องชั่ง (Balance) ชนิดทศนิยม 4 ตำแหน่ง

วิธีการ

1. นำ Crucible ที่มีตัวอย่างซึ่งวิเคราะห์หา Cellulose แล้วนำไปเผา (Ignite) ในเตาเผา ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง
2. เอาออกใส่ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็น ชั่งน้ำหนักหา Lignin

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิธีคำนวณ

% Lignin = (W4 - W5 x 100)/W3

เมื่อ W4 = น้ำหนัก Crucible + น้ำหนักเยื่อใยหลังการอบ

W5 = น้ำหนัก Crucible + น้ำหนัก เยื่อใยหลังการเผา (Ignite)

W3 = น้ำหนักตัวอย่าง

% เถ้าที่ไม่ละลายในกรด = (W5 - W2 x 100) / W3

เมื่อ W5 = น้ำหนัก Crucible + น้ำหนักเยื่อใยหลังการเผา (Ignite)

W2 = น้ำหนัก Crucible เปล่า ก่อนนำมาใช้วิเคราะห์หา ADF

W3 = น้ำหนักตัวอย่าง (Sample)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นายกงจักร ลมวิชัย เกิดเมื่อวันที่ 13 เมษายน 2527 เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่ 1 - 6 ที่โรงเรียนคำนางตุ้ม โนนสวรรค์ ชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนเมยวดีพิทยาคม ชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนหนองพอกวิทยาลัย จังหวัดร้อยเอ็ด สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต (สิ่งแวดล้อม) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี 2550 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี 2554 ปัจจุบันทำงานในตำแหน่งนักวิจัย ประจำศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี